

ISSN 2411-7374 (print)
ISSN 2782-6643 (online)



РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ

2/2023





Учредитель

Академия наук Республики Татарстан

Издатель

Институт проблем экологии и недропользования
АН РТ

Главный редактор

Р.Р. Шагидуллин

д.х.н., член-корреспондент АН РТ, директор Института
проблем экологии и недропользования АН РТ

Заместители главного редактора

В.З. Латыпова

д.х.н., профессор, член-корреспондент АН РТ,
профессор кафедры прикладной экологии Казанского
(Приволжского) федерального университета

Д.В. Иванов

к.б.н., заместитель директора по научной работе
Института проблем экологии и недропользования
АН РТ

Редакция

Ответственный секретарь: к.с.-х.н. Э.Х. Рупова,
старший научный сотрудник, Институт проблем
экологии и недропользования АН РТ
Компьютерная верстка: А.Ю. Бородовская
Фото на обложке: А.Ю. Бородовская

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по
надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации
в СМИ ПИ № ФС77-67305 от 30.09.2016

Журнал входит в перечень рецензируемых научных
изданий, рекомендованных ВАК РФ, в которых долж-
ны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата
наук, ученой степени доктора наук.

Журнал включен в систему Российского индекса
научного цитирования (РИНЦ)

Периодичность выпуска: 4 раза в год
Электронная версия журнала содержится на сайте
eLIBRARY.ru

Подписной индекс ПМ018 в каталоге «Почта России».
Цена свободная

Адрес редакции:

420087 г. Казань, ул. Даурская, 28
Тел./факс: +7 (843) 275-96-95

e-mail: rjaeco@mail.ru
www.rjae.ru

Редакционная коллегия

В.И. Бармин – д.г.н., профессор, декан геолого-геогра-
фического факультета, заведующий кафедрой экологии,
природопользования, землеустройства и БЖД Астра-
ханского государственного университета

В.Д. Богданов – д.б.н., член-корреспондент РАН, зав.
лабораторией экологии рыб и биоразнообразия водных
экосистем Института экологии растений и животных
УРО РАН

Ю.А. Горшков – д.б.н., ведущий научный сотрудник
Волжско-Камского государственного природного биос-
ферного заповедника

В.А. Дауальтер – д.г.н., профессор, главный научный
сотрудник лаборатории водных экосистем Института
проблем промышленной экологии Севера РАН

В.В. Законнов – д.г.н., главный научный сотрудник ла-
боратории гидрологии и гидрохимии Института биоло-
гии внутренних вод им. А.Д. Папанина РАН

Е.Ю. Колбовский – д.г.н., профессор, ведущий науч-
ный сотрудник кафедры физической географии матери-
ков и геоэкологии Московского государственного уни-
верситета им. М.В. Ломоносова

А.А. Лукин – д.б.н., профессор, начальник Федераль-
ного селекционно-генетического центра рыбоводства
филиала ФГБУ «Главное бассейновое управление по
рыболовству и сохранению водных биологических ре-
сурсов»

Ю.П. Переведенцев – д.г.н., профессор кафедры мете-
орологии, климатологии и экологии атмосферы Казан-
ского (Приволжского) федерального университета

С.А. Поддубный – д.г.н., зав. лабораторией гидрологии
и гидрохимии Института биологии внутренних вод им.
А.Д. Папанина РАН

Ш.Р. Поздняков – д.г.н., директор Института исследо-
ваний континентальных водных объектов Российского
государственного гидрометеорологического универси-
тета

В.А. Румянцев – д.г.н., профессор, академик РАН,
советник по науке Санкт-Петербургского научного
Центра РАН

Р.Н. Салиева – д.ю.н., профессор, зав. лабораторией
правовых проблем недропользования, экологии и то-
пливно-энергетического комплекса Института проблем
экологии и недропользования АН РТ

В.И. Сафарова – д.х.н., профессор, начальник управ-
ления государственного аналитического контроля Ми-
нистерства природопользования и экологии Республики
Башкортостан, профессор кафедры безопасности про-
изводства и промышленной экологии Уфимского госу-
дарственного авиационного университета

В.В. Снакин – д.б.н., профессор, зав. сектором музея
землеведения Московского государственного универси-
тета им. М.В. Ломоносова, г. Москва; зав. лабораторией
ландшафтной экологии Института фундаментальных
проблем биологии РАН

А.М. Смирнов – д.б.н., академик РАН, научный руко-
водитель Всероссийского научно-исследовательского ин-
ститута ветеринарной санитарии, гигиены и экологии;
Т.Х. Спаркс – PhD, профессор, Институт зоологии По-
знаньского университета естественных наук (Польша);
Музей зоологии Кембриджского университета (Велико-
британия)

Ю.А. Тунакова – д.х.н., профессор, зав. кафедрой
общей химии и экологии Казанского национального
исследовательского технического университета им.
А.Н. Туполева – КАИ.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой
на «Российский журнал прикладной экологии»

Founder

Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

Publisher

Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of the Tatarstan Academy of Sciences

Chief Editor

R.R. Shagidullin

Doctor in Chemistry, Corresponding Member of the
Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Director,
Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of the Tatarstan Academy of Sciences

Deputy Chief Editors

V. Z. Latypova

Doctor in Chemistry, Corresponding Member of the
Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Professor
of the Department of Applied Ecology of Kazan (Volga)
Federal University

D.V. Ivanov

PhD in Biology, Deputy Director, Institute for Problems of
Ecology and Mineral Wealth Use of the Tatarstan Academy
of Sciences

Executive secretary

E.H. Rupova – PhD in Agriculture, Senior Researcher,
Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use
of the Tatarstan Academy of Sciences

Designer: A.Yu. Borodovskaya

Cover photo: A.Yu. Borodovskaya

The journal is registered by Federal service for supervision
in the sphere of telecom, information technologies and mass
communications. Registration number: series PI №FS77-
67305 on September 30, 2016.

The journal is indexed in Russian Science Citation Index
(RSCI)

Frequency: 4 issues per year

The electronic version of the journal is available on the
website eLIBRARY.ru.

Subscription index PM018 in catalogue of «Pochta Possii».
Free price.

Editorial address

28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia
Phone: +7 (843) 275-96-95

e-mail: rjaeco@mail.ru
www.rjae.ru

Editorial board

A.N. Barmin – Doctor in Geography, Professor, Dean
of Geological and Geographical Faculty, Head of the
Department of Ecology, Nature Management, Land
Management and Life Safety, Astrakhan State University

V.D. Bogdanov – Doctor in Biology, Corresponding
Member of RAS, Head Laboratory of Fish Ecology and
Biodiversity of Aquatic Ecosystems, Institute of Plant and
Animal Ecology of the Ural Branch of RAS

Y.A. Gorshkov – Doctor in Biology, Leading Researcher,
Volga-Kama State Natural Biosphere Reserve

V.A. Dauvalter – Doctor in Geography, Professor, Chief
Researcher, Institute of the Industrial Ecology Problems of
the North of the Kola Science Center of RAS

V.V. Zakonov – Doctor in Geography, Leading Researcher,
I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS

E.Yu. Kolbovsky – Doctor in Geography, Professor,
Leading Researcher of the Department of Physical
Geography of Continents and Geocology, Lomonosov
Moscow State University

A.A. Lukin – Doctor in Biology, Professor, Head of the
Federal Selection Genetic and Fish Farming Center, Branch
of «Main Basin Administration for Fishing State and
Conservation of Aquatic Biological Resources»

Yu.P. Perevedentsev – Doctor in Geography, Professor,
Head of the Department of Meteorology, Climatology
and Ecology of the Atmosphere, Kazan (Volga) Federal
University

S.A. Poddubny – Doctor in Geography, Head of the
laboratory of hydrology and hydrochemistry, I.D. Papanin
Institute for Biology of Inland Waters RAS

Sh.R. Pozdnyakov – Doctor in Geography, Director,
Institute of Inland Waters Research, Russian State
Hydrometeorological University

V.A. Rumyantsev – Doctor in Geography, Professor,
Academician of RAS, Scientific Advisor, St. Petersburg
Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

R.N. Salieva – Doctor in Law, Professor, Head of the
Laboratory of Legal Problems of Mineral Wealth Use,
Ecology and Fuel and Energy Complex, Institute for
Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of the
Tatarstan Academy of Sciences

V.I. Safarova – Doctor in Chemistry, Professor, Head of the
Department of State Analytical Control, Ministry of Natural
Resources and Ecology of the Republic of Bashkortostan;
Professor of the Department of Production Safety and
Industrial Ecology, Ufa State Aviation University

V.V. Snakin – Doctor in Biology, Professor, Head of the
Sector of the Museum of Geography, Lomonosov Moscow
State University; Head of the Laboratory of Landscape
Ecology, Institute of Fundamental Problems of Biology of
RAS

A.M. Smirnov – Doctor in Biology, Academician of
RAS, Scientific Director, All-Russian Research Institute of
Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology

T.H. Sparks – T.H. Sparks – PhD, Professor, Institute of
Zoology, Poznań University of Life Sciences (Poland); Mu-
seum of Zoology, University of Cambridge (UK)

Yu.A. Tunakova – Doctor in Chemistry, Professor, Head of
the Department of General Chemistry and Ecology, Kazan
National Research Technical University named after A.N.
Tupolev – KAI

The authors are responsible for the content of the articles.

Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

СОДЕРЖАНИЕ

Экология природных систем

М.Б. Фардеева, Н.А. Котова
Особенности динамики популяций деревьев
в условиях оползнево-осыпных склонов
правобережья реки Волги 4

М.В. Зяблинцева
К вопросу о функциональном зонировании
Национального парка «Салаир» 18

С.В. Полоз
Загрязнение земель и мест обитания диких
копытных яйцами и ларвами гельминтов
подотрудки Strongylata 27

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

С.В. Александров, А.В. Сташко
Использование индексов загрязненности воды для
оценки многолетней изменчивости
состояния Вислинского Залива 38

*В.С. Валиев, Д.В. Иванов, А.Т. Горшкова,
О.Н. Урбанова, И.В. Мустакимова*
Использование искусственных нейронных сетей для
решения задач интерполяции руслового стока
(на примере реки Казанки) 45

Экология почв

*В.И. Кулагина, Л.М. Сунгатуллина, С.С. Рязанов,
Р.Р. Шагидуллин, А.Б. Александрова, Э.Х. Рупова*
Микробная биомасса и ферментативная
активность лесных почв Раифского участка
Волжско-Камского заповедника 49

*А.Б. Александрова, В.И. Кулагина, Д.В. Иванов,
В.В. Маланин, А.А. Марасов*
Оценка запасов углерода в лесных
подстилках Раифского участка
Волжско-Камского заповедника 57

*А.А. Утомбаева, А.А. Вершинин,
Э.Р. Зайнулгабидинов, И.В. Князев, А.М. Петров*
Изучение возможности применения осадков
сточных вод для биологической рекультивации
нефтезагрязненных серых лесных почв 63

Экспериментальная экология

А.В. Егорова, А.Ф. Гатиятуллина, Т.Б. Калининкова
Особенности динамики нематоцидной
активности пирантела 70

Правила для авторов 77

CONTENTS

Ecology of natural systems

M.B. Fardeeva, N.A. Kotova
Specificity of dynamics of the tree
populations on the landslide-scare slopes
of the Volga River right coast 4

M.V. Zyablintseva
On the issue of functional zoning of the National park
«Salair» 18

S.V. Polaz
Contamination of lands and habitats of wild
ungulates by eggs and larvae of helminths
of the Strongylata suborder 27

Hydrology of land, water resources, hydrochemistry

S.V. Aleksandrov, A.V. Stashko
The use of water pollution indices to assess
the long-term variability of the state of the
Vistula Lagoon 38

*V.S. Valiev, D.V. Ivanov, A.T. Gorshkova,
O.N. Urbanova, I.V. Mustakimova*
Using artificial neural networks to solve problems of
channel flow interpolation (on the example
of the Kazanka river) 45

Soil ecology

*V.I. Kulagina, L.M. Sungatullina, S.S. Ryazanov,
R.R. Shagidullin, A.B. Alexandrova, E.H. Rupova*
Microbial biomass and enzymatic activity
of forest soils in the Raifa area of
the Volzhsko-Kamsky reserve 49

*A.B. Alexandrova, V.I. Kulagina, D.V. Ivanov,
V.V. Malanin, A.A. Marasov*
Assessment of carbon reserves in forest litter
of the Raifa area of Volzhsko-Kamsky
state natural biosphere reserve 57

*A.A. Utombaeva, A.A. Vershinin, E.R. Zainulgabidinov,
I.V. Knyazev, A.M. Petrov*
Study of the possibility of using sewage sludge for
biological reclamation of oil-contaminated gray
forest soils 63

Experimental ecology

A.V. Egorova, A.F. Gatiyatullina, T.B. Kalinnikova
The characteristic of dynamics of pyrantel
nematocidal activity 70

Правила для авторов 77

М.Б. Фардеева, Н.А. Котова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, orchis@inbox.ru

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ДЕРЕВЬЕВ В УСЛОВИЯХ ОПОЛЗНЕВО-ОСЫПНЫХ СКЛОНОВ ПРАВОБЕРЕЖЬЯ РЕКИ ВОЛГИ

Мониторинг состояния растительности и биоразнообразия флоры в склоновых сообществах правобережья р. Волги и Куйбышевского водохранилища позволяют оценить степень активности/устойчивости экзогенных процессов на данных участках и предупредить риски возникновения новых. В работе представлены результаты исследования лесных сообществ в 2008–2022 гг. на устойчивом, временно-стабильном и активном оползневых склонах и поиски эффективных методов фитоиндикации для оценки их состояния. Определение сукцессионных серий фитоценозов по элементам оползня позволили выявить демутационно-дегрессивные ряды растительности, которые зависят от активности оползнево-осыпных процессов, а также условий субстрата и крутизны склона, возможностей поступления зачатков и антропогенных факторов. Появление 2–3-летнего подроста деревьев отмечено через 20 лет после последнего экзогенного процесса. Использование коэффициента общности Серенсена-Чекановского для оценки сходства фанерофитов в фитоценозах коренного участка и элементов оползня является эффективным – чем ближе его значение к 1, тем интенсивнее проходят процессы лесовосстановления. По результатам оценки динамики численности и возрастной структуры лесообразующих видов деревьев выявлено, что устойчивая полночленная популяция *Quercus robur* отмечена только на коренных участках склонов. Популяции *Tilia cordata* и *Acer platanoides* имеют полночленную структуру по устойчивым элементам оползня, формируя лесные сообщества, обеспечивают закрепление субстрата. На основе оценки высоты и диаметра стволов разных деревьев выявлено, что многоярусная структура леса отмечена только в дубравах коренного участка склона. В нижней части устойчивых, либо временно-стабильных элементов оползня нарушается многоярусность сообществ, снижается густота их древостоя и сомкнутость крон, увеличивается доля *T. cordata*, *A. platanoides*, *B. pendula*, *P. tremula*. Динамика запасов древесины разных деревьев отражает продуктивность лесных сообществ и особенности лесовосстановления в условиях экзогенных процессов, что зависит от возраста оползня, подвижности либо устойчивости его элементов. Ведение в практику методов фитоиндикации обеспечивает эффективное определение активности/устойчивости склонов по берегам Куйбышевского водохранилища.

Ключевые слова: оползнево-осыпные склоны; сукцессивные серии фитоценозов; динамика популяций деревьев; продуктивность; берега Куйбышевского водохранилища.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.04.17>

Введение

Мониторинг оползнево-осыпных процессов правобережья реки Волги позволяет оценить состояние растительных сообществ в условиях гравитационной подвижности грунта берегов, обусловленных как естественным действием реки, так и антропогенным регулированием уровня Куйбышевского водохранилища. Состояние растительных сообществ оползневых склонов зависит от площади и состояния коренных участков склона, которые часто подвергаются интенсивной распахке, а также застройке и прокладке различных коммуникаций (Nigmatullina et al., 2015). Особенно опасным считается комплекс абразионно-оползневых процессов, как самых значи-

тельных по интенсивности переработки берегов и площади проявления. На правобережье р. Волги подобные нарушения часто приводят к чрезвычайным ситуациям, связанным с угрозой полного разрушения зданий и сооружений, дорог, деградации земельных ресурсов, а также к ухудшению экологического состояния водоема (Yermolaev et al., 2021). В связи с этим необходима разработка различных методов мониторинга активности оползневых движений, что имеет решающее значение для определения опасности оползней, оценки их воздействия на объекты инфраструктуры и природные экосистемы (Фардеева, 2021; Kotova et al., 2022).

Основными направлениями исследований

оползневых процессов являются инвентаризация местоположения оползней (Cruden, 1991), оценка устойчивости склонов, районирование территорий по степени опасности возникновения оползневых явлений (Van Westen et al., 2006; Fell et al., 2008; Petschko et al., 2014; Nigmatullina et al., 2015). Мониторинг оползневых процессов необходим для понимания механизмов их возникновения и раннего предупреждения экологических рисков (Casagli et al., 2010; Corominas et al., 2014; Thiebes et al., 2014). При этом применяются как традиционные методы изучения свойств пород и грунтов, наблюдения за уровнем подземных вод в специально оборудованных скважинах, их измерения на опорных реперах, топографическая съемка, так и современные методы дистанционного зондирования: беспилотные летательные аппараты (UAV) и глобальная навигационная спутниковая система (GNSS) (Gafurov et al., 2021).

Для фитоиндикации оползневой активности склонов часто используются индикаторные особенности различных видов растений, их флористические, экологические, фитоценотические, биоморфологические и другие характеристики (Турманина, 1964а,б; Виктор, 1988; Guida et al., 2008; Ермохина, 2009; Кожевникова и др., 2010). Экосистемные и популяционные характеристики растительного покрова, особенно состав и структура фитоценозов по элементам склона, отражают их положение в сукцессионном ряду сообществ, которое, по нашим предположениям, зависит от возраста оползня, подвижности либо устойчивости его морфологических элементов (Fardeeva et al., 2018; Котова, 2020).

Цель работы: оценить состояние и продуктивность популяций лесообразующих видов деревьев в склоновых лесах, подверженных экзогенным процессам.

Материалы и методы исследования

Куйбышевское водохранилище расположено в центральной части бассейна Средней Волги на пересечении лесной и лесостепной ландшафтных зон Приволжской возвышенности. Нормальный подпорный уровень водохранилища – 53 абс. м. Годовая амплитуда колебаний уровня составляет около 6 м, что оказывает существенное влияние на активизацию экзогенных процессов на склонах и трансформацию фитоценозов по берегам Волги и Камы (Yermolaev et al., 2021). Абсолютные высоты – 175–215 м на севере и 250–270 м на юге.

Территория исследований относится к Приволжскому возвышенно-равнинному региону широколиственных лесов (Бакин и др., 2000). На

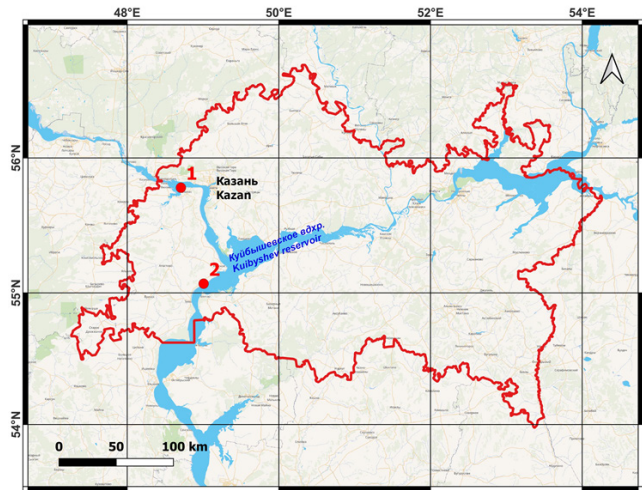


Рис. 1. Местоположение исследуемых участков
Fig. 1. Location of the studying sites

данной территории развиты верхнечетвертичные и современные оползни. Среди современных оползней часть их относится к категории старых, стабильных, некоторые являются действующими. Верхнечетвертичные оползни представляют собой средней величины блоки, мощностью до 30 м, состоящие из раздробленных глин и мергелей с прослоями известняков. В рельефе они образуют достаточно выраженные оползневые ступени. В настоящее время в теле древних оползней на отдельных участках, в зоне выклинивания подземных вод и на оползневых откосах, развиваются современные оползни и овраги. Причинами возникновения экзогенных процессов следует считать увлажнение татарских глинисто-мергелистых пород подземными, дождевыми и талыми водами, как выпадающими на склоне, так и стекающими по нему, и подъем уровня Куйбышевского водохранилища в весенний период (Дедков, 1970).

Сбор полевых материалов проводился на правом берегу р. Волги, на территории Верхнеуслонского и Камско-Устьинского районов Республики Татарстан: участок 1 – территория ООПТ «Зоостанция КГУ – Массив Дачный»; участок 2 – в 5.5 км к юго-западу от с. Сюкеево, где активно протекают оползневые процессы (рис. 1).

Участок 1 представляет стабильный оползень скольжения и проседания, покрытый лесом. Высоты здесь варьируют от уреза водохранилища (53 м) до 180–190 м на коренном склоне. Крутизна склонов превышает 45 градусов, что в целом характерно для этого участка правобережья. На данной территории расположены биостанция «Эколог» (1-я ступень, внутриоползневой откос) и «Зоологическая биостанция» (внутриоползневой откос, 3-я ступень), где частично скашиваются луга, вырубается подрост, отмечается рекреа-



Рис. 2. Схема расположения профилей
на участке 1

Fig. 2. Profiles at the 1st site

ционная нагрузка. После консервации биостанции «Эколог» начался процесс лесовосстановления – здесь формируются вторично-производные березняки. На участке исследования находятся три оврага, где активны эрозионные процессы.

Исследования проводились в 2008–2009 гг., 2011–2012 гг., 2019–2022 гг. на четырех профилях (рис. 2, 3). В 2018–2019 гг. на коренном склоне была проведена сплошная рубка леса и санитарная – на оставшейся опушке (рис. 3), что увеличило риски активности эрозионных и оползневых процессов на данной территории.

Участок 2 интересен тем, что здесь находится временно-стабильный оползневой склон (скольжения, проседания), где оползание произошло в 1972–1974 гг. (профиль 5, рис. 4, 5) и для закрепления коренного склона была произведена посадка сосны с дубом. Относительно свежий оползень выдавливания и проседания возник в 2001 г. (профиль 6), где на коренном склоне сохранился дубово-липовый лес. Склон активный, дальнейшее смещение оползневых масс происходило в 2003, 2005 и 2016 гг., исследования проводились в 2018–2021 гг. Абсолютные высоты достигают 190 м на коренном склоне, крутизна склонов на откосе оползня превышает 35–45 градусов.

Предполагалось, что на основе дендрологического анализа возраста *Pinus sylvestris* L. на коренном склоне, бровке и надоползневом откосе (профили 1–3, 5) можно будет датировать возраст оползневой склона. По результатам дендрологи-

ческого анализа *P. sylvestris* в склоновых лесах ООПТ «Зоостанция КГУ – Массив Дачный» возраст сосен оценивается в 120–140 лет, в посадке сосны на профиле 5 – в 48 лет (Фардеева и др., 2019). Возраст современного оползня (профиль 6) определен на основе космических снимков – 20 лет (1999–2016) (рис. 4).

Основными лесообразующими видами условно-коренных сообществ Предволжья являются: *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Hubs., *U. laevis* Pall., редко содоминантами могут быть *Pinus sylvestris* L., *Populus nigra* L., *P. tremula* L., *Betula pendula* Roth. Дубовые фитоценозы правобережья р. Волги разнообразны на видовом и экосистемном уровнях, устойчивы и имеют хорошие показатели роста и развития – к 44–65-летнему возрасту накапливают значительный объем сырорастающей стволовой древесины (Ульданова, Сабиров, 2021). Коренные сообщества по склонам северных и восточных экспозиций представлены дубравами с липой и доминированием в травостое *Aegopodium podagraria* L., *Mercurialis perennis* L., *Asarum europaeum* L., *Galium odorata* (L.) Scop., *Carex pilosa* Scop., по склонам южных или западных экспозиций отмечаются дубравы с кленом и липой с *Laser trilobum* (L.) Borkh., *Convallaria majalis* L.

На склоне выделяли геоморфологические элементы оползня: коренной (первичный) склон, бровка надоползневого откоса, надоползневой откос, оползневые ступени, внутриоползневые откосы, оползневые бугры по Е.П. Емельяновой (1972). В фитоценозах оползневых элементов проводились геоботанические описания (Воронов, 1973). Внутри каждого элемента закладывалась учетная площадь 200–400 м². Все деревья картировались на площадке с учетом высоты, диаметра ствола по онтогенетическим группам. Высота ствола, как признак конкурентоспособности за свет (Laughlin, 2013), и площадь поперечного сечения стволов, запас стволовой древесины, отражающие продуктивность, являются функциональными признаками деревьев. Объем древеси-



Рис. 3. Участок 1 на разновременных снимках Google Earth

Fig. 3. The 1st site on multi-temporal images presented in the Google Earth



Рис. 4. Схема расположения профилей на участке 2
Fig. 4. Profiles at the 2nd site

ны определялся по формуле Губера $V=G \times L$, где L – длина ствола, G – площадь поперечного сечения ствола (Тишин, 2011; Тишин и др., 2021). Запас древесины определенных видов деревьев определялся как сумма объемов древесины на 100 м². Для оценки функционального разнообразия деревьев учитывали формулу древостоя и видовой состав подроста. Данные заносились в базу для оценки численности, возрастной структуры, динамики и состояния популяций лесообразующих видов деревьев на склоне.

Функциональное разнообразие фанерофитов в фитоценозах разных элементов оползня подразделили на 3 группы: деревья 1-й величины 15–30 м (перечисленные выше) – мезофанерофиты; деревья 2-й величины 5–10 м – *Malus sylvestris* Mill., *Sorbus aucuparia* L., *Padus avium* Mill., *Salix caprea* L. – микрофанерофиты; кустарники – *Corylus avellana* L., *Lonicera xylosteum* L., *Euonymus verrucosa* Scop., *Viburnum opulus* L., *Cerasus fruticosa* Pall., *Rubus caesius* L. – нанофанерофиты. Для оценки сходства или различия видового состава фитоценозов оползневых элементов каждого профиля использовался коэффици-

ент общности Серенсена-Чекановского (КОСЧ), учитывающий факт присутствия того или иного вида в изучаемых фитоценозах. Значение КОСЧ изменяется от 0 до 1, чем оно больше, тем более идентичны флоры. Для наших задач важно, как будет изменяться коэффициент общности между сообществом фанерофитов коренного склона и отдельными фитоценозами оползневых элементов в случае, когда само сообщество коренного склона не подвергается сильным изменениям. Значительное различие КОСЧ между элементами оползня говорит о существенных различиях условий биотопов.

Результаты и их обсуждение

Сукцессия фитоценозов и разнообразие фанерофитов на склонах

Фитоценотические исследования сообществ, посвященные изучению звеньев сукцессионных рядов растительности, которая развивается после завершения экзогенных воздействий, позволяют выявить разнообразие дигрессивно-демутационных процессов, идущих в фитоценозах по элементам оползня в зависимости от разных факто-

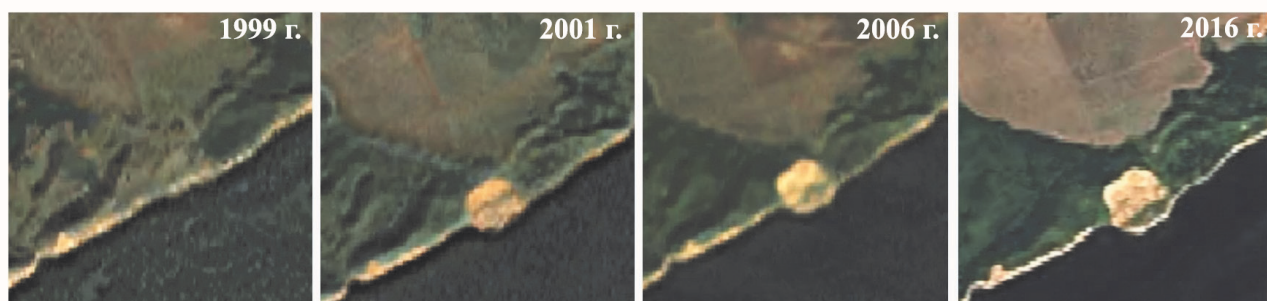


Рис. 5. Участок 2 на годовых композитах снимков Landsat 1999–2016 гг.
Fig. 5. The 2nd site on annual composites of Landsat images 1999–2016.

ров. Сукцессионную динамику растительности склонов можно проследить в сравнении активных оползней с условно-стабильными (табл. 1), где уже начались или заканчиваются процессы восстановления сообществ, близких по своему составу и структуре к фитоценозам коренного склона.

Индикаторами дигрессивно-демутационных процессов являются эколого-динамические ряды растительности, которые выделяются в условиях экзогенных воздействий (Турманина, 1963, 1964а,б; Корженевский, 1987; Виктор, 1988; Ермохина, 2009). По данным В.И. Турманиной (1964а,б), изучившей более 100 оползневых склонов в Москве и Московской области, о давности завершения оползневого цикла можно судить

по характеру звеньев сукцессионных серий: 1. Мать-и-мачеха и некоторые другие виды трав иногда создают сомкнутый покров на второй-третий год; 2. Через 10–15 лет на обнажении появляется подрост сосен, берез или ив, если обнажение сформировалось на месте лесов, к 50–60 годам эти деревья образуют сомкнутые насаждения; 3. Коренные типы лесных насаждений (ельники, дубравы и др.) восстанавливаются лишь к 100 годам, а нередко значительно позднее.

Время зарастания оползневых элементов склона зависит от сохранности или поступления зачатков с ближайших фитоценозов и различных абиотических факторов, которые были выявлены нами по типу развития фитоценозов на изученных склонах (табл. 1). На осыпающихся участках – на-

Таблица 1. Сукцессионная динамика лесных фитоценозов на оползневых участках
Table 1. Successional dynamics of forest phytocenoses in landslide areas

Элемент оползня Landslide element	Устойчиво-стабильный оползень Профиль 1 Возраст более 100 лет Steady-stable landslide Profile 1 Age over 100 years	Временно-стабильный оползень Профиль 5 Возраст около 50 лет Temporarily stable landslide Profile 5 Age around 50 years	Активный оползень Профиль 6 Возраст около 20 лет Active landslide Profile 6 Age around 20 years
Коренной склон Original slope	Дубняк с сосной и липой снытьево-пролесниковый 4ДЗСЗЛ+К; осв. 0.7; ПП 100%	Сосняк с дубом злаково- разнотравный (посадка 1972 г.), 8С2Д; осв. 0.4; ПП 100%	Дубняк с липой и кленом копытнево-снытьевый 4Д4Л2К+В; осв. 0.7; ПП 80%
Бровка склона Crown	Липняк с кленом и сосной ландышево-снытьевый 5Л2С1Д2К; осв. 0.7; ПП 80%	Сосняк с дубом разнотравный (посадка) 8С2Д; осв. 0.4; ПП 80%; по кромке склона отмечаются трещины	Липняк с кленом и дубом снытьево-ландышевый 6Л2Д2К; осв.0.5; ПП 60%; отмечаются трещины и ложбины
Надоползневой откос Main scarp	Демутация: липняк с кленом и дубом копытнево-снытьевый 5Л2Д2К1С+Ос; осв. 0.6; ПП 80%	Первичная сукцессия: редколесье кустарниково-разнотравное с подростом сосны, клена, вишни степной осв. 0.3; ПП 30%; отмечено осыпание склона	Первичная сукцессия: участками разрастается мать-и-мачеха осв. 100%; ПП 5%; отмечено осыпание склона
1-я ступень 1 st stage	Демутация: липняк с дубом волосистоосоково-снытьевый 5ЛЗК1Д+С+В; осв. 0.7; ПП 100%; выровненный участок	Демутация: кленовик с липой и дубом снытьево-разнотравный 7К2Л1Д; осв. 0.5; ПП 50%; бугристо-ложбинный участок	Дигрессия: кустарниковое раз- нотравье с <i>Rubus caesius</i> , редкий подрост <i>P. sylvestris</i> (2-3 года), мать-и-мачеха, клевер ПП 30%; бугристо-трещиноватый участок с выходом грунтовых вод
Внутриоползневой откос между 1-й и 2-й ступенями Intralandslide slope between the 1 st and 2 nd stages	Дигрессия: злаково-разнотравный луг с редколесьем <i>B. pendula</i> ПП 120%; отмечены рубка деревьев, покос травы, рекреация	Плохо выделяемый элемент	Плохо выделяемый элемент
2-я ступень 2 nd stage	Демутация: липняк с кленом и березой осоково-снытьевый 6Л2К2Б1Д, осв. 0.7; ПП 80%; выровненный участок	Демутация: липняк с дубом и кле- ном снытьево-ландышевый 6Л2Д2К+В, осв. 0.7; ПП 70%; выровненный участок	Демутация: молодой дубняк (около 40 лет) разнотравный 6Д+4Ив (<i>S. caprea</i>); осв.0.5; ПП 80%; бугристо-трещиноватый участок
Внутриоползневой откос между 2-й и 3-й ступенями Intralandslide slope be- tween 2 nd and 3 rd stages	Демутация: липняк копытнево-снытьевый 9Л1К+Д, осв. 0.6; ПП 60%	Дигрессия: кустарниковое разнотравье с вишней степной и мать-и-мачехой, осв. 0.1; ПП 20%; отмечена осыпь	Нет элемента
3-я ступень 3 rd stage	Дачные участки	Заболоченное редколесье с ивой козьей и тополем черным тростниково-осоковое	Нет элемента

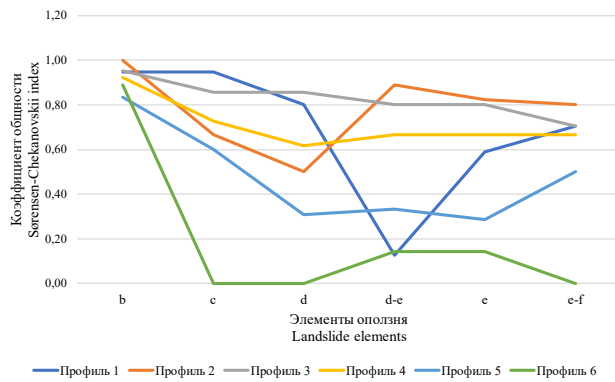


Рис. 6. Динамика коэффициента общности фанерофитов на профилях 1–6:

b – бровка, c – надоползневой откос; d – 1-я ступень, d-e – внутриоползневой откос между 1-й и 2-й ступенями, e – 2-я ступень, e-f – внутриоползневой откос между 2-й и 3-й ступенями.

Fig. 6. Dynamics of Sørensen-Chekanovskii index of phanerophytes on profiles 1–6:

b – crown, c – main scarp; d – 1st stage, d-e – intralandslide slope between the 1st and 2nd stages, e – 2nd stage, e-f – intralandslide slope between the 2nd and 3rd stages

доползневых и внутриоползневых откосах (профили 5, 6) разрастается рудерально-разнотравная растительность (*Tussilago farfara* L., *Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey., реже *Artemisia absinthium* L., *A. vulgaris* L., *Trifolium pretense* L., *T. medium* L.), проективное покрытие 5–10%. На более устойчивых элементах оползня – ступенях, если отмечаются трещины и выходы грунтовых вод (профили 5, 6), формируется редколесье, в отсутствие нарушения грунта (профили 1, 5) отмечаются процессы лесовосстановления и формирования длительно-производных липняков с участием клена и дуба или кленовников с липой.

Сопоставление коэффициентов общности (КОСЧ) состава фанерофитов в фитоценозах элементов оползня с коренным склоном, рассматриваемым нами как эталонный фитоценоз, представлено на рисунке 6. КОСЧ временно-стабильного склона (профиль 5) варьирует от 0.83 для пары «коренной склон – бровка» до 0.29 для пары «коренной склон – 2 ступень».

КОСЧ активного склона (профиль 6) варьирует от 0.89 для пары «коренной склон – бровка» до 0 для пар «коренной склон – надоползневой откос», «коренной склон – 1 ступень», «коренной склон – внутриоползневой откос между 1 и 2 ступенями». Низкий уровень общности состава фанерофитов прямо указывает на кардинальные отличия сообществ разрушенных местообитаний от биотопа коренного склона. Отсутствие общих видов в выборке может говорить о значительном воздействии подвижек оползня на смену условий местообитаний и видовой состав фитоценозов и

фанерофитов.

КОСЧ устойчивых склонов (профили 1–4) для пары «коренной склон – бровка» варьирует от 0.9 до 1, где описания проводились еще до начала сплошной рубки леса коренного участка в 2018 г. Наиболее сглаженная динамика коэффициента общности фанерофитов (от 0.98 до 0.76) в фитоценозах разных элементов оползня отмечена на профиле 3, где отсутствует какое-либо воздействие.

Наименьшие показатели КОСЧ 0.54 отмечаются для пары «коренной склон – 1 ступень» (2 профиль), 0.36 – для пары «коренной склон – внутриоползневой откос между 1 и 2 ступенями» (1 профиль): это участки биостанции «Эколог», где находятся дороги, тропинки, покосы, происходит вырубка подроста деревьев и рекреация. Различия довольно существенны, но при этом в выборках присутствуют общие виды деревьев, что может указывать на начало лесовосстановления.

Динамика состава и структуры популяций деревьев

Особенности динамики численности и возрастной структуры лесообразующих видов деревьев в фитоценозах оползневых склонов также отражают степень устойчивости/активности изучаемых участков. Возрастные спектры разных видов деревьев представлены на примере их популяций в условиях стабильно-устойчивого, временно-стабильного и активного склонов (рис. 7–10). По оставшейся кромке леса коренного склона (профиль 1), где была частично проведена санитарная рубка деревьев, в 2021 г. заложили новую учетную площадку.

Эдификатором условно-коренных широколиственных лесов Предволжья является *Q. robur*. Популяции дуба черешчатого, которые сохранились на участках коренного склона и бровки (рис. 6, профиль 1), характерны для всех четырех профилей ООПТ «Зоостанция КГУ – Массив Дачный». Возрастная структура *Q. robur* – полночленная только по оставшимся фрагментам дубрав коренного склона, здесь наряду с генеративными дубами отмечаются имматурные и виргинильные растения (рис. 6). Возрастная структура популяции *P. sylvestris* – неполночленная, представлена только генеративными соснами. Подрост *P. sylvestris* и *Q. robur*, как самых светолюбивых деревьев, не возобновляется в нижней части склона в условиях сильного затенения длительно-производных липняков с кленом. В целом полночленная структура популяций деревьев является признаком ее устойчивого состояния в пространстве и времени и соответственно индикаторным признаком устойчивого состояния леса.

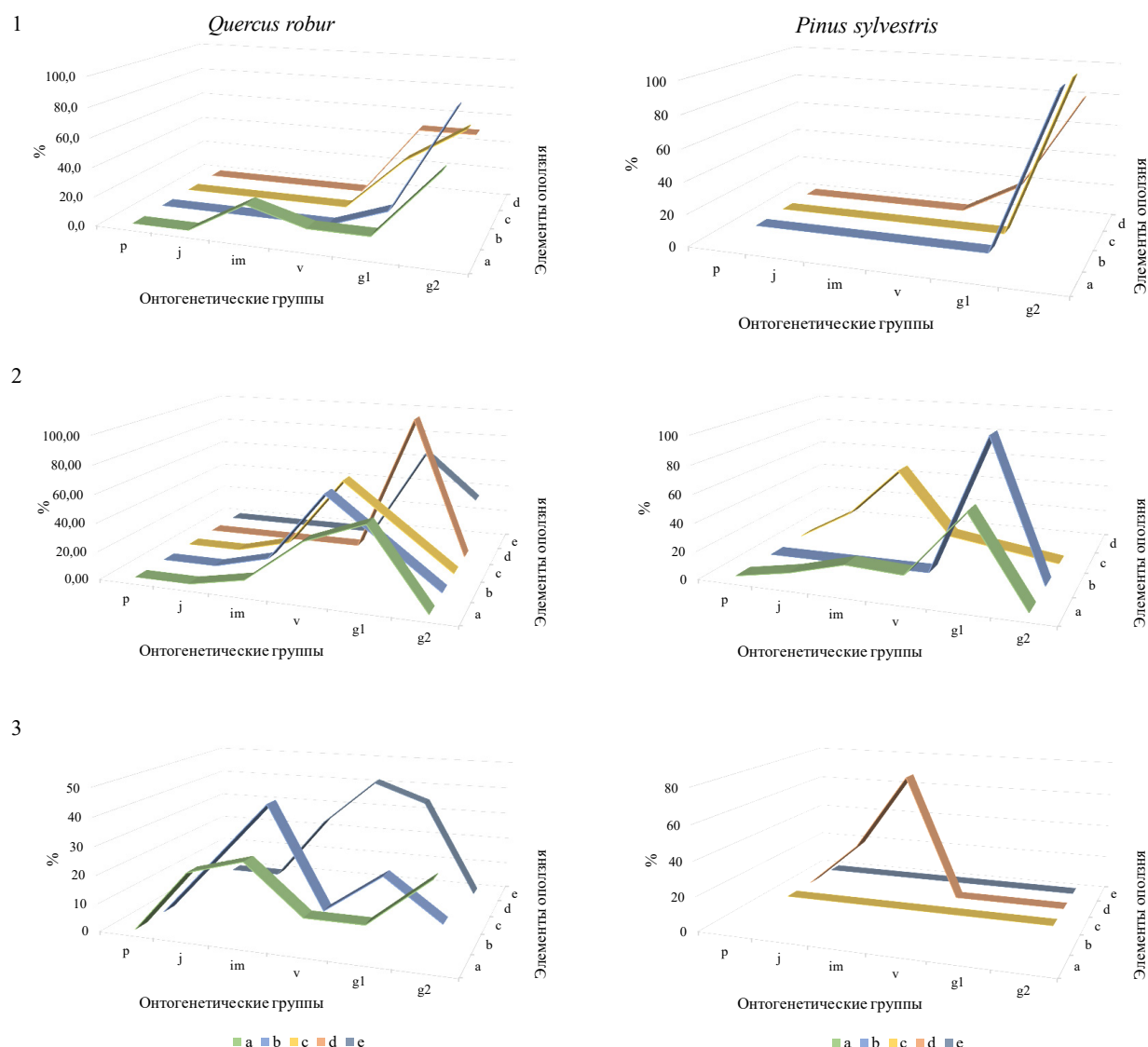


Рис. 7. Возрастные спектры *Quercus robur* и *Pinus sylvestris* на разных участках:
1 – устойчиво-стабильный склон (профиль 1), 2 – временно-стабильный (профиль 5),
3 – активный (профиль 6)

a – коренной склон, *b* – бровка, *c* – надоползневой откос; *d* – 1-я ступень, *e* – 2-я ступень; *p* – проростки, *j* – ювенильные, *im* – имматурные, *v* – виргинильные, *g1* – молодые и *g2* – средневозрастные генеративные.

Fig. 7. Age spectra *Quercus robur* and *Pinus sylvestris* on different profiles:

1 – steady-stable slope (profile 1); 2 – temporarily stable (profile 5); 3 – active (profile 6)

a – original slope, *b* – crown, *c* – main scarp; *d* – 1st stage, *e* – 2nd stage; *p* – seedling, *j* – juvenile, *im* – immature, *v* – virginile, *g1* – young and *g2* – middle-aged generative

Подобная полночленная структура популяции *Q. robur* характерна и для коренного участка в Камско-Устьинском районе (рис. 7, профиль 6), по оставшимся здесь фрагментам коренных дубрав можно представить, какие участки леса погибли при оползневых процессах на участке временно-стабильного склона в 1970-х годах, что, по-видимому, было обусловлено интенсивной распашкой земель (рис. 3, 4). На активном оползне отмечено формирование редколесья дуба на 2-й ступени, в популяции единично встречаются молодые генеративные дубы (рис. 7, профиль 6). В светлой посадке сосны с дубом (рис. 7, профиль 5) наряду с молодыми генеративными дубами вы-

сотой 7–8 м, возобновление дуба хорошее, интенсивно разрастается подрост.

По элементам оползневых склонов (профили 1–4, 5), в длительно-производных липняках *Q. robur* (рис. 7, откосы, 1-я и 2-я ступени) и *Pinus sylvestris* (рис. 6, профиль 1) отмечаются единичными генеративными особями. Имматурные (5–6 лет) и виргинильные (8–12 лет) *P. sylvestris* разрастаются по надоползневому откосу временно-стабильного оползня (рис. 6, профиль 5), что способствует некоторому закреплению этих участков. На активном оползне ювенильные (2–3 года) сосны единично отмечены на 1-й ступени в 2021 г.

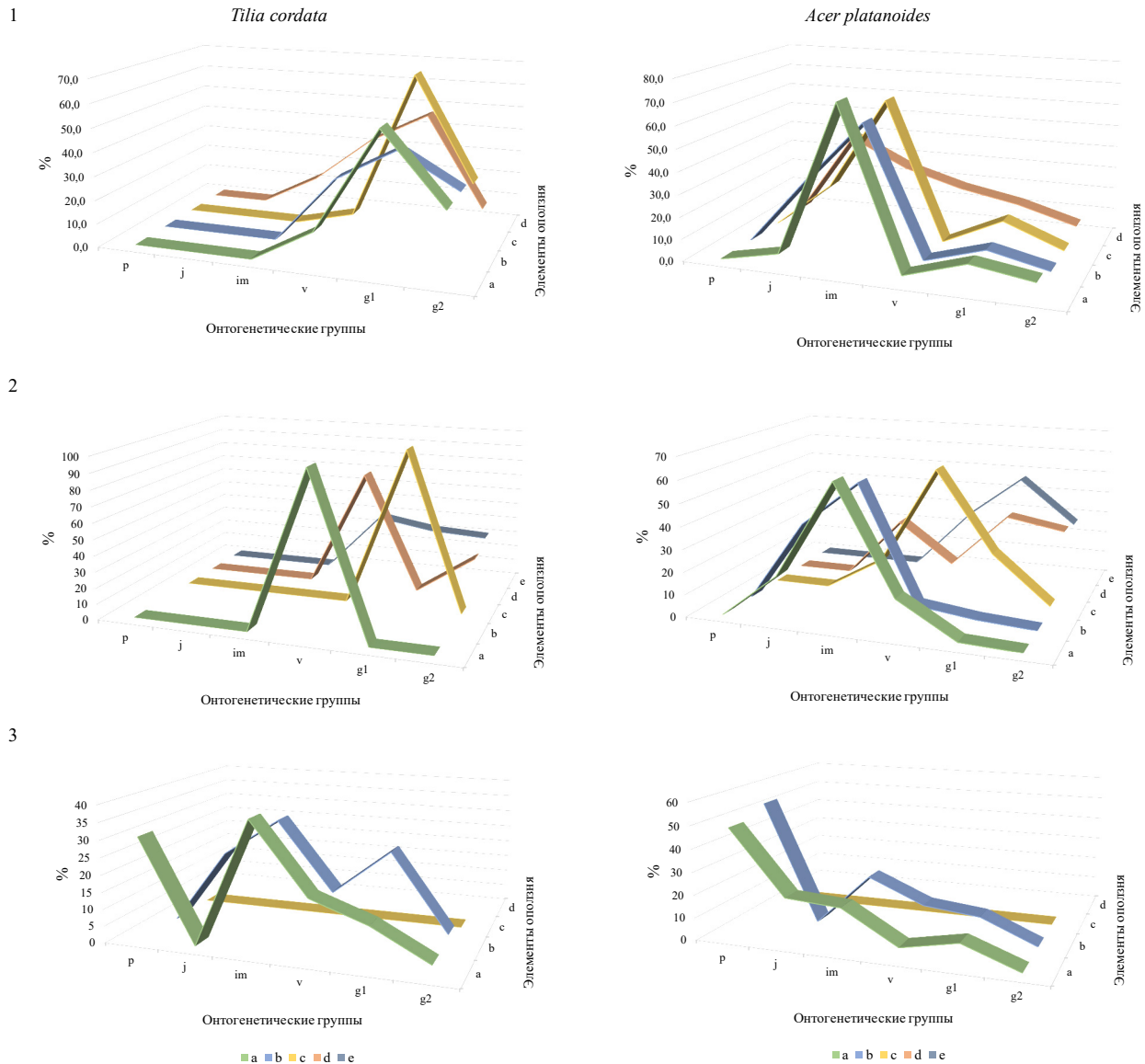


Рис. 8. Возрастные спектры *Tilia cordata* и *Acer platanoides* на разных участках: 1 – устойчиво-стабильный склон (профиль 1), 2 – временно-стабильный (профиль 5), 3 – активный (профиль 6) а – коренной склон, б – бровка, с – надоползневой откос; d – 1-я ступень, e – 2-я ступень; p – проростки, j – ювенильные, im – имматурные, v – виргинильные, g1 – молодые и g2 – средневозрастные генеративные

Fig. 8. Age spectra *Tilia cordata* and *Acer platanoides* on different profiles:

1 – steady-stable slope (profile 1), 2 – temporarily stable (profile 5), 3 – active (profile 6) a – original slope, b – crown, c – main scarp; d – 1st stage, e – 2nd stage; p – seedling, j – juvenile, im – immature, v – virginile, g1 – young and g2 – middle-aged generative

По результатам популяционного анализа выявлено, что полноценная возрастная структура с хорошим подростом отмечается только у *T. cordata* и *A. platanoides* во всех лесах по элементам устойчивого склона на ООПТ «Зоостанция КГУ – Массив Дачный» (рис. 8). На профиле 6 активного оползневого склона полноценные популяции *T. cordata* и *A. platanoides* отмечены на сохранившемся коренном склоне и бровке, где эти виды формируют второй древесный ярус. На временно-стабильном склоне (профиль 5) условно-коренных сообществ не сохранилось. *A. platanoides* представлен в посадке сосны с дубом

разрастающимся подростом из проростков, ювенильных, имматурных и виргинильных особей, подрост липы отмечен единично. На более пологих участках – 1-й и 2-й ступенях временно-стабильного склона – полноценные популяции *T. cordata* и *A. platanoides* способствует закреплению склона и демутации лесных фитоценозов. В длительно-производных липняках также встречаются *Ulmus glabra* или *U. laevis*, единично *P. nigra* и *P. tremula*. Разрастается подлесок из *Sorbus aucuparia*, *Padus avium*, *Salix caprea*, *Corylus avellana*, *Lonicera xylosteum*, *Euonymus verrucosa*, *Viburnum opulus*.

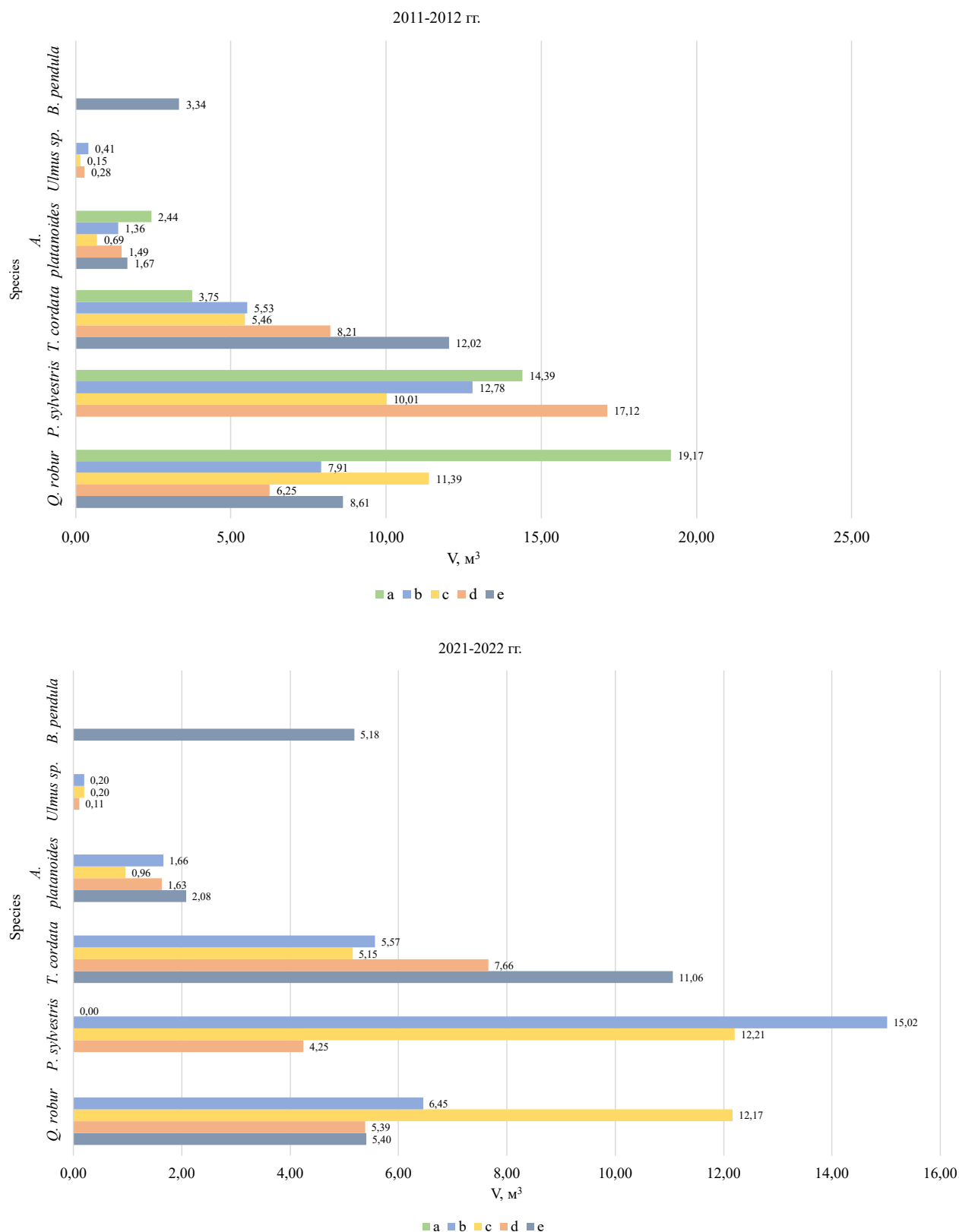


Рис. 9. Запасы древесины на 100 м² (участок 1, профиль 1) в 2011–2012 гг. и 2021–2022 гг.:

a – коренной склон, b – бровка, c – надоползневой откос; d – 1-я ступень, e – 2-я ступень

Fig. 9. Wood volumes on 100 m² by landslide elements (site 1, profile 1) in 2011–2012 and 2021–2022:

a – original slope, b – crown, c – main scarp; d – 1st stage, e – 2nd stage

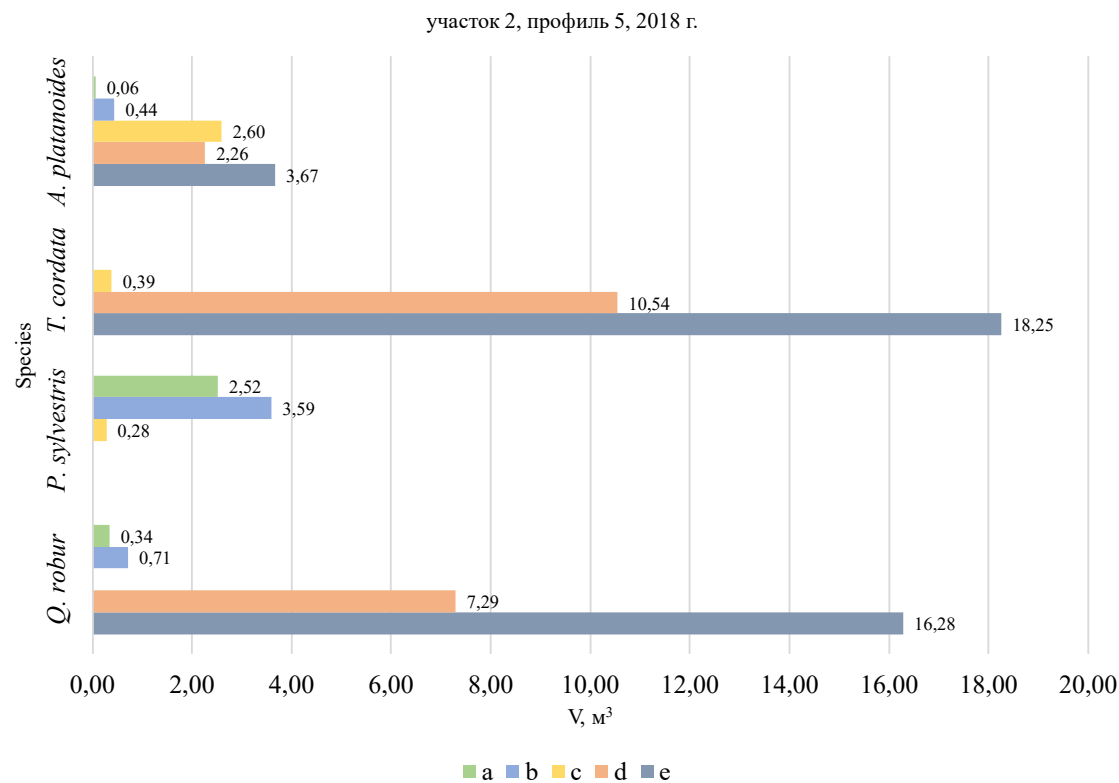
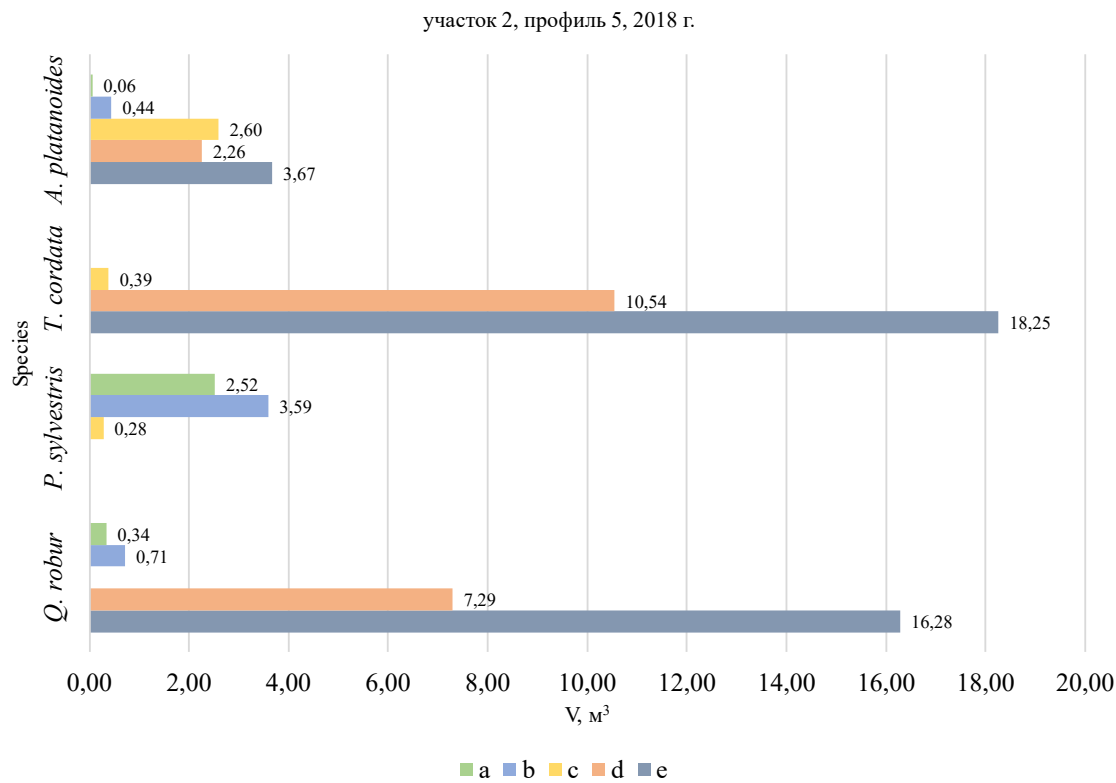


Рис. 10. Запасы древесины на временно-стабильном склоне (участок 2, профиль 5) в 2018 г. и на активном склоне (участок 2, профиль 6) в 2021 г.:

a – коренной склон, b – бровка, c – надоползневой откос; d – 1-я ступень, e – 2-я ступень

Fig. 10. Wood volumes on 100m² by landslide elements of temporarily stable landslide (site 2, profile 5) in 2018 and active landslide (site 2, profile 6) in 2021:

a – original slope, b – crown, c – main scarp; d – 1st stage, e – 2nd stage

Продуктивность лесообразующих деревьев в склоновых лесах

Площади поперечного сечения разных видов деревьев, как и объемы древесины, отображают продуктивность лесного сообщества и стадии лесовосстановления фитоценозов по элементам оползня. Наибольшие средние площади поперечного сечения генеративных *Q. robur* отмечаются на коренном участке леса и бровке склонов: на профиле 1 средняя площадь поперечного сечения дуба составляет 0.38 м², средняя высота ствола 23.5 м, на профиле 6 – 0.24 м², средняя высота 20.2 м, на временно-стабильном склоне (профиль 5) – 0.032 м², т.к. средний диаметр молодых деревьев только 0.1–0.12 м, средняя высота – 7.8 м. В редколесье дуба, на 2-й ступени активного оползня, площади поперечного сечения составляют 0.04 м². Площади поперечного сечения использовались для оценки объемов древесины лесообразующих видов деревьев и запасов древесины в пересчете на 100 м² леса в фитоценозах элементов оползней (рис. 9–10).

Динамика запасов древесины разных видов деревьев отражает продуктивность лесных сообществ и процессы лесовосстановления в условиях экзогенных процессов. По данным 2021 г., после сплошной рубки, запасы древесины в центральной части коренного склона на территории ООПТ резко сократились (рис. 9, профиль 1). В посадке сосны (рис. 10, профиль 5) запасы древесины *Q. robur* и *P. sylvestris* незначительны, возраст деревьев около 50 лет. Напротив, в условиях стабильных (рис. 10) элементов склона (1–2 ступени) запасы древесины *Q. robur*, *T. cordata* и *A. platanoides* значительны и сопоставимы с подобными характеристиками на устойчивом склоне (рис. 9, профиль 1), что указывает на хорошее состояние лесных сообществ и закрепление склона.

На активном оползневом склоне (рис. 10, профиль 6) значительные запасы древесины *Q. robur* и *T. cordata* сохранились только на коренном склоне и бровке и сопоставимы с подобными характеристиками условно-коренных дубрав на ООПТ «Зоостанция КГУ – Массив Дачный». Резкое снижение запасов древесины деревьев ниже по склону отражает последствия потерь продуктивных лесов в результате оползнево-осыпных процессов.

Заключение

Введение в широкую практику методов фитоиндикации могло бы стать одним из решений, позволяющим оптимизировать проведение мониторинга оползневых процессов. Однако, скорость

формирования фитоценоза зависит от условий субстрата, возможностей поступления зачатков с окружающих пространств, а также от крутизны, экспозиции склона и антропогенных воздействий.

По величине коэффициента общности Серенсена-Чекановского можно судить о начале процессов лесовосстановления, что подтверждается высокими их показателями на стабильных элементах оползня или в целом устойчивых склонах. Напротив, активно продолжающиеся оползнево-осыпные процессы в верхней части склона (профили 5–6) препятствуют формированию даже сорно-полевой растительности, разрастаются только *T. farfara*, *L. tatarica* и *R. caesius*, представленные длиннокорневищными и корнеотпрысковыми вегетативно-подвижными биоморфами, быстро закрепляющимися в субстрате. Появление 2-3-летнего подроста *P. sylvestris* по кромке склона (профиль 6) в 2021 г. указывает на закрепление диаспор деревьев на 1-й ступени и, возможно, 1-й стадии лесовосстановления.

Динамика популяций лесообразующих видов деревьев и их продуктивность по элементам склона отражает степень нарушения или восстановления леса, что актуально для закрепления берегов р. Волги и сохранения здесь естественной растительности. Отсутствие восстановления леса по оползневым элементам в течение 10–20 лет является интегральным показателем активно продолжающихся оползневых процессов.

Условно-коренные дубравы отличаются многоярусной структурой, где четко выделяются 1-й и 2-й древесные ярусы (A_1 , A_2), ярус подроста и подлеска также представлен двумя ярусами (B_1 , B_2). Лесовосстановление в нижней части склонов (профили 1–4, 5) происходит за счет активного зарастания ступеней вегетативно подвижными видами – *T. cordata*, *S. caprea* и быстрорастущими деревьями – *A. platanoides*, *B. pendula*, *P. tremula*. Для *A. platanoides* и *T. cordata* заметно хорошее развитие молодых генеративных особей по элементам оползня, что увеличивает продуктивность фитоценозов на определенных стадиях лесовосстановления. Восстановление широколиственных лесов по элементам оползня устойчивого и временно-стабильного склонов идет за счет формирования длительно-производных липняков. Но в отличие от условно-коренных дубрав, ярусная структура липняков представлена только одним древесным ярусом, что снижает густоту древостоя и его продуктивность. На оползневых элементах значительно снижается численность *Q. robur* и нарушается структура его популяций. При отсутствии антропогенных воздействий на коренной склон и дополнительном

укреплении склонов искусственными посадками сохраняется надежда на лесовосстановительные процессы, сохранение лесных сообществ и частичное закрепление склонов берегов Куйбышевского водохранилища.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030)».

Список литературы

1. Бакин О.В., Рогова Т.В., Ситников А.П. Сосудистые растения Татарстана. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000. 497 с.
2. Викторов С.В., Ремезова Г.Л. Индикационная геоботаника. М.: Изд-во Московского ун-та, 1988. 168 с.
3. Воронов А.Г. Геоботаника. М: Высшая школа, 1973. 384 с.
4. Дедков А.П. Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Приволжье. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. 457 с.
5. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М: Недра, 1972. 308 с.
6. Ермохина К.А. Фитоиндикация экзогенных процессов в тундрах Центрального Ямала: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 25 с.
7. Кожевникова М.В., Муглиев Б.И., Фардеева М.Б. Фитоиндикация оползневых смещений при мониторинге экзогенных процессов // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. №2. С. 171–177.
8. Корженевский В.В. Методические рекомендации по фитоиндикации современных экзогенных процессов. Ялта: ГНБС. 1987. 41 с.
9. Котова Н.А., Фардеева М.Б. Использование дендрологического анализа *Pinus sylvestris* L. в условиях активизации оползнево-осыпных процессов правобережья р. Волги // Материалы II Международной научной конференции молодых ученых. Минск: Колоград, 2020. С. 26–28.
10. Тишин Д.В. Оценка продуктивности древостоев. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2011. 31 с.
11. Тишин Д.В., Чижикина Н.А., Искандиров П.Ю., Лебедева Г.П. Радиальный прирост годичных колец сосны обыкновенной в условиях болот Марийского Полесья // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №4. С. 20–24. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.4.20.24>
12. Турманина В.И. Величина армирующей роли корней деревьев // Вестник МГУ. Сер. География. 1963. №4. С. 17–22.
13. Турманина В.И. Взаимодействие растительности с оползневыми процессами склонов на примере оползней Москвы и подмосковья: Автореф. дисс. ... канд. географ. наук. М., 1964а. 42 с.
14. Турманина В.И. Использование мать-и-мачехи как показателя недавней нарушенности почво-грунтов // Советская геология. 1964б. №4. С. 131–132.
15. Ульданова Р.А., Сабиров А.Т. Продуктивность дубовых насаждений прибрежных территорий реки Волги // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №3. С. 11–22. doi: [10.24852/2411-7374.2021.3.11.22](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.3.11.22).
16. Фардеева М.Б., Котова Н.А. Особенности инвентаризации ООПТ и состояние популяций редких растений в условиях оползневых склонов правобережья реки Волги // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2021. С. 89–105. doi: [10.24412/2072-8816-2021-15-2-89-105](https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-2-89-105).
17. Фардеева М.Б., Котова Н.А., Кожевникова М.В. Предварительные итоги дендргеоморфологического анализа оползневых участков с использованием *Pinus sylvestris* L. // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2019. №3. С. 130–135. doi: [10.24411/2073-1035-2019-10243](https://doi.org/10.24411/2073-1035-2019-10243).
18. Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry // Landslides. 2010. 7(3). P. 291–301. doi: [10.1007/s10346-010-0215-y](https://doi.org/10.1007/s10346-010-0215-y).
19. Corominas J., Westen C.J., Frattini P., Cascini L., Jean-Philippe Fotopoulou, S., Catani F., Eeckhaut M., Mavrouli, O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T. // Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of engineering geology and the environment. 2014. Vol. 73. P. 209–263. doi: [10.1007/s10064-013-0538-8](https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8).
20. Cruden D.M. A simple definition of a landslide // Bulletin of the International Association of Engineering geology. 1991. Vol. 43(1). P. 27–29. doi: [10.1007/BF02590167](https://doi.org/10.1007/BF02590167).
21. Fardeeva M.B., Kozhevnikova M.V., Bogdanova V.V., Kotova N.A. La aplicación práctica de diferentes métodos de fitoindicación para estimar deslizamientos de tierra // Dilemas contemporáneos: educación, política y valores. 2018. P. 67.
22. Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning // Engineering geology. 2008. Vol. 102. №3–4. P. 85–98. doi: [10.1016/j.enggeo.2008.03.022](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022).
23. Gafurov A., Yermolayev O., Usmanov B., Khomyakov P. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // InterCarto InterGIS. 2021. Vol. 27(2). P. 327–339. doi: [10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339).
24. Guida D., Pelfini M., Santilli M. Geomorphological and dendrochronological analyses of a complex landslide in the southern Apennines // Geografiska Annaler: Ser. A, Physical geography. 2008. Vol. 90(3). P. 211–226. doi: [10.1111/j.1468-0459.2008.340.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2008.340.x).
25. Kotova N.A., Fardeeva M.B., Usmanov B.M. Population dynamics of forest-forming tree species on landslide-scare slopes of the right bank of the Kuibyshev reservoir (Tatarstan) // IOP Conf. Ser.: Earth and environmental sciences. 2022. 1070(1). 012007. doi: [10.1088/1755-1315/1070/1/012007](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012007).
26. Laughlin D. The intrinsic dimensionality of plant traits and its relevance to community assembly // Journal of ecology. 2013. Vol. 102(1). doi: [10.1111/1365-2745.12187](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12187).
27. Nigmatullina E.F., Fardeeva M.B., Amirova R.R. Mechanism of water resource inter-industry protection // Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2015. Vol. 6 (6). P. 1660–1665.
28. Petschko H., Brenning A., Bell R., Goetz J., Glade T. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria // Natural hazards and earth system science. 2014. Vol. 14 (1). P. 95–118. doi: [10.5194/nhess-14-95-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-95-2014).
29. Thiebes B., Bell R., Glade T., Jäger S., Mayer J., Anderson M., Holcombe L. Integration of a limit-equilibrium model into a landslide early warning system // Landslides. 2014. Vol. 11(5). P. 859–875. doi: [10.1007/s10346-013-0416-2](https://doi.org/10.1007/s10346-013-0416-2).
30. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? // Bulletin of engineering geology and the environment. 2006. Vol. 65(2). P. 167–184. doi: [10.1007/s10064-005-0023-0](https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0).
31. Yermolaev O., Usmanov B., Gafurov A., Poesen J., Vedeneva E., Lisetskii, F., and Nicu, I.C. Assessment of Shoreline Transformation Rates and Landslide Monitoring on the Bank of Kuibyshev Reservoir (Russia) Using Multi-Source Data // Remote sensing. 2021. Vol. 13(21). 4214. doi: [10.3390/rs13214214](https://doi.org/10.3390/rs13214214).

References

1. Bakin O.V., Rogova T.V., Sitnikov A.P. Sosudistye rasteniya Tatarstana [Vascular plants of Tatarstan]. Kazan': Kazan university, 2000. 497 p.
2. Viktorov S.V. Remezova G.L. Indikatsionnaya geobotanika [Indication Geobotany]. Moscow: Moscow University, 1988. 168 p.
3. Voronov A.G. Geobotanika [Geobotany]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 384 p.
4. Dedkov A.P. Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v Kazansko-Ulyanovskom Privolzh'e [Exogenous relief formation in the Kazan-Ulyanovsk Volga region]. Kazan': Kazan University, 1970. 457 p.
5. Emel'yanova E.P. Osnovnye zakonomernosti opolznevykh protsessov [Main regularities of landslide processes]. Moscow: Nedra, 1972. 308 p.
6. Ermokhina K.A. Fitoindikatsiya ekzogenykh protsessov v tundrach Tsentral'nogo Yamala [Phytoindication of exogenous processes in the tundras of Central Yamal]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.). Moscow, 2009. 25 p.
7. Kozhevnikova M.V., Mugliev B.I., Fardeeva M.B. Fitoindikatsiya opolznevykh smeshchenii pri monitoringe ekzogenykh protsessov [Phytoindication of landslide displacements during monitoring of exogenous processes] // Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology]. 2010. No 2. P. 171–177.
8. Korzhenevskii V.V. Metodicheskie rekomendatsii po fitoindikatsii sovremennykh ekzogenykh protsessov [Guidelines for phytoindication of modern exogenous processes]. Yalta, 1987. 41 p.
9. Kotova N.A., Fardeeva M.B. Ispol'zovanie dendrologicheskogo analiza Pinus sylvestris L. v usloviyakh aktivizatsii opolznevo-osypnykh protsessov pravoberezh'ya r. Volgi [The use of dendrological analysis of Pinus sylvestris L. in the conditions of activation of landslide processes on the right bank of the Volga River] // Materialy II Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh [II International Scientific Conference of Young Scientists «Modern Problems of Experimental Botany». Minsk: Kolograd. 2020. P. 26–28.
10. Tishin D.V. Otsenka produktivnosti drevostoev [Evaluation of the productivity of forest stands]. Kazan': Kazan University, 2011. 31 p.
11. Tishin D.V., Chizhikova N.A., Iskandirov P.Yu., Lebedeva G.P. Radial'nyi prirost godichnykh kolets sosny obyknovЕННОЙ в usloviyakh bolot Mariiskogo Poles'ya [Radial growth of growth rings of Scotch pine in the swamps of the Mari Polesie] // Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii. [Russian Journal of Applied Ecology]. 2021. No 4. P. 20–24. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.4.20.24>.
12. Turmanina V.I. Velichina armiruyushchei roli kornei derev'ev [The value of the reinforcing role of tree roots] // Vestnik MGU: Geografiya [Bull. of Moscow State University: Geography]. 1963. No 4. P. 17–22.
13. Turmanina V.I. Vzaimodeistvie rastitel'nosti s opolznevyimi protsessami sklonov na primere opolznei Moskvy i podmoskov'ya [Interaction of vegetation with landslide processes of slopes on the example of landslides in Moscow and the Moscow region]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.). Moscow: 1964a. 42 p.
14. Turmanina V.I. Ispol'zovanie mat'-i-machekhi kak pokazatelya nedavnei narushennosti pochvo-gruntov [The use of coltsfoot as an indicator of recent soil disturbance] // Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]. 1964b. No 4. P. 131–132.
15. Uldanova R.A., Sabirov A.T. Produktivnost dubovikh nasazhdenii pribreznikh territorii reki Volgi [Productivity of oak plantations in the coastal areas of the Volga River] // Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii. [Russian Journal of Applied Ecology]. 2021. No 3. P. 11–22. doi: [10.24852/2411-7374.2021.3.11.22](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2021.3.11.22).
16. Fardeeva M.B., Kotova N.A. Osobennosti inventarizatsii OOPT i sostoyanie populyatsii redkikh rastenii v usloviyakh opolznevykh sklonov pravoberezh'ya reki Volgi [Inventory features of protected areas and the state of populations of rare plants in the conditions of landslide slopes of the right bank of the Volga River] // Fitoraznoobrazie Vostochnoi Evropy [Phytodiversity of Eastern Europe]. 2021. P. 89–105. doi: [10.24412/2072-8816-2021-15-2-89-105](https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-2-89-105).
17. Fardeeva M.B., Kotova N.A., Kozhevnikova M.V. Predvaritel'nye itogi dendrogeomorfologicheskogo analiza opolznevykh uchastkov s ispol'zovaniem Pinus sylvestris L. [Preliminary results of dendrogeomorphological analysis of landslide areas using Pinus sylvestris L.] // Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii [Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology]. 2019. No3. P. 130–135. doi: [10.24411/2073-1035-2019-10243](https://doi.org/10.24411/2073-1035-2019-10243).
18. Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry // Landslides. 2010. 7(3). P. 291–301. doi: [10.1007/s10346-010-0215-y](https://doi.org/10.1007/s10346-010-0215-y).
19. Corominas J., Westen C.J., Frattini P., Cascini L., Jean-Philippe Fotopoulou, S., Catani F., Eeckhaut M., Mavrouli, O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T. // Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of engineering geology and the environment. 2014. Vol. 73. P. 209–263. doi: [10.1007/s10064-013-0538-8](https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8).
20. Cruden D.M. A simple definition of a landslide // Bulletin of the International Association of Engineering geology. 1991. Vol. 43(1). P. 27–29. doi: [10.1007/BF02590167](https://doi.org/10.1007/BF02590167).
21. Fardeeva M.B., Kozhevnikova M.V., Bogdanova V.V., Kotova N.A. La aplicación práctica de diferentes métodos de fitoindicación para estimar deslizamientos de tierra // Dilemas contemporáneos: educación, política y valores. 2018. P. 67.
22. Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning // Engineering geology. 2008. Vol. 102. No3–4. P. 85–98. doi: [10.1016/j.enggeo.2008.03.022](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022).
23. Gafurov A., Yermolayev O., Usmanov B., Khomyakov P. Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // InterCarto InterGIS. 2021. Vol. 27(2). P. 327–339. doi: [10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339).
24. Guida D., Pelfini M., Santilli M. Geomorphological and dendrochronological analyses of a complex landslide in the southern Apennines // Geografiska Annaler: Ser. A, Physical geography. 2008. Vol. 90(3). P. 211–226. doi: [10.1111/j.1468-0459.2008.340.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2008.340.x).
25. Kotova N.A., Fardeeva M.B., Usmanov B.M. Population dynamics of forest-forming tree species on landslide-scrée slopes of the right bank of the Kuibyshev reservoir (Tatarstan) // IOP Conf. Ser.: Earth and environmental sciences. 2022. 1070(1). 012007. doi: [10.1088/1755-1315/1070/1/012007](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012007).
26. Laughlin D. The intrinsic dimensionality of plant traits and its relevance to community assembly // Journal of ecology. 2013. Vol. 102(1). doi: [10.1111/1365-2745.12187](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12187).
27. Nigmatullina E.F., Fardeeva M.B., Amirova R.R. Mechanism of water resource inter-industry protection // Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences. 2015. Vol. 6 (6). P. 1660–1665.
28. Petschko H., Brenning A., Bell R., Goetz J., Glade T. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria // Natural hazards and earth system science. 2014. Vol. 14 (1). P. 95–118. doi: [10.5194/nhess-14-95-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-95-2014).
29. Thiebes B., Bell R., Glade T., Jäger S., Mayer J.,

Anderson M., Holcombe L. Integration of a limit-equilibrium model into a landslide early warning system // *Landslides*. 2014. Vol. 11(5). P. 859–875. doi: 10.1007/s10346-013-0416-2.

30. Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? // *Bulletin of engineering geology and the environment*. 2006. Vol. 65(2). P. 167–184. doi: 10.1007/s10064-005-0023-0.

31. Yermolaev O., Usmanov B., Gafurov A., Poesen J., Vedeneva E., Lisetskii, F., and Nicu, I.C. Assessment of Shoreline Transformation Rates and Landslide Monitoring on the Bank of Kuibyshev Reservoir (Russia) Using Multi-Source Data // *Remote sensing*. 2021. Vol. 13(21). 4214. doi: 10.3390/rs13214214.

Fardeeva M.B., Kotova N.A. Specificity of dynamics of the tree populations on the landslide-scrub slopes of the Volga River right coast.

Monitoring of vegetation condition and biodiversity of flora in the slope communities of the right bank of the Volga River and the Kuibyshev reservoir allows us to assess the degree of activity and stability of the exogenous processes and prevent the risks of new ones. The paper presents the results of a study of forest communities in 2008–2022 on stable, temporarily stable, and active landslide slopes and the search for efficient phytoindication methods to assess their condition. Detection of succession groups of phytocenoses on different landslide elements allowed us to identify demutation-degressive vegetation series. They depend on the activity of landslide-scrub processes, substrate conditions, slope steepness, the possibility of rudiments entering, and the influence of anthropogenic factors. The appearance of 2-3-year-old undergrowth of trees was detected 20

years after the last exogenous process. Using the Sørensen-Chekanovskii coefficient for assessing the similarity of phanerophytes in phytocenoses of the original site and other elements of the landslide is effective. The closer its value to 1, the more intense the reforestation processes. Based on the results of assessing the dynamics of the amount and age structure of forest-forming species, it was revealed that a stable full-membered population of *Quercus robur* was found only on the original parts of the slopes. The populations of *Tilia cordata* and *Acer platanoides* have a full-membered structure on the stable elements of a landslide, forming forest communities that provide substrate fixation. Based on the trunk's height and diameter assessment of different trees, it was revealed that the multi-tiered structure was typical only for the oak forests of the original part of the slope. In the lower part of the stable or temporarily stable elements of the landslide, the multi-tiered communities are disturbed, the density of their forest stand and canopy density decrease, and the percentage of *T. cordata*, *A. platanoides*, *B. pendula*, and *P. tremula* increases. The dynamics of wood reserves of different tree species reflect the productivity of forest communities and reforestation processes under exogenous processes, which depends on the landslide age, activity, or stability of its morphological elements. The use of phytoindication methods provides effective detection of the activity and stability of the slopes of the Kuibyshev reservoir banks.

Keywords: landslide-scrub slopes; successive series of phytocenoses; tree population dynamics; productivity; banks of the Kuibyshev reservoir.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.03.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 18.04.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 24.04.2023

Сведения об авторах

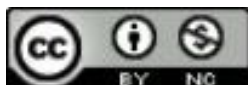
Фардеева Марина Борисовна, доктор биологических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: orchis@inbox.ru.

Котова Наталия Андреевна, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: kotova.natalia90@gmail.com.

Information about the authors

Marina B. Fardeeva, D.Sci. in Biology, Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: orchis@inbox.ru

Nataliya A. Kotova, Graduate Student, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: kotova.natalia90@gmail.com.



М.В. Зяблинцева

Институт водных и экологических проблем СО РАН, zyablintseva.rita@mail.ru

К ВОПРОСУ О ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ЗОНИРОВАНИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «САЛАИР»

Национальный парк «Салаир» – федеральная особо охраняемая природная территория, созданная в 2020 г. в Алтайском крае. В статье описаны характерные особенности территории национального парка, имеющие значение при проведении функционального зонирования. Обоснованы предложения по функциональному зонированию с учетом совмещения задач сохранения природных комплексов, поддержания традиционного уклада жизни и хозяйствования местного населения и развития рекреационно-туристической деятельности. Раскрыты принципы и подходы, лежащие в основе формирования функционально-режимной структуры национального парка, которые должны обеспечивать органичное, непротиворечивое совмещение строгой охраны природных комплексов и щадящего, неистощительного использования природных ресурсов местными сообществами.

Ключевые слова: Национальный парк «Салаир»; функциональное зонирование; режим охраны; охрана природы; рекреация.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.18.26>

Введение

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) различных категорий отличаются своими задачами и особенностями режима охраны. Национальные парки России по целям их создания и управления, особенностям территории и действующему режиму полностью или в основном соответствуют критериям охраняемых природных территорий категории II (National Park) МСОП (Стишов, Дадли, 2018). Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 №33-ФЗ на национальные парки возложен ряд задач, определяющих полифункциональность охраняемой территории. Помимо заповедной охраны природы, национальные парки должны сохранять историко-культурные объекты, создавать условия для регулируемого туризма и отдыха, осуществлять научно-исследовательскую деятельность и восстановление нарушенных природных и историко-культурных комплексов и объектов.

В общемировых масштабах прослеживаются тенденции к расширению задач национальных парков. Охраняемые территории II категории должны функционировать также и для решения социальных и экономических задач; для туризма, способствующего росту местной экономики. Территории должны являться общественно-культурной ценностью в качестве участков девственной природы и создаваться преимущественно в силу научных, социальных и экономических причин

(Sheppard, 2006). МСОП признает, что распределение различных стратегий управления в пределах одной охраняемой территории является обоснованным и может внести существенный вклад в сохранение природы (Dudley, 2008).

Согласно российскому законодательству, в границы национальных парков могут входить территории населенных пунктов, а земельные участки включаться без изъятия из хозяйственного использования. Таким образом, необходимость функционального зонирования национальных парков очевидна, она объясняется не только разнообразием и степенью сохранности природных комплексов в границах любого из них, но и соответствующих им методов управления и ведения хозяйства, а также типов воздействия со стороны различных групп посетителей, местного населения и хозяйствующих субъектов (Попов и др., 2001). Все эти причины и лежат в основе целесообразности установления в границах национальных парков дифференцированного режима охраны и использования с учетом природных, исторических и иных условий (Чижова, 2006).

Режим особой охраны территории и состав функциональных зон устанавливается положением о национальном парке. В настоящее время в национальных парках Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» предусмотрены следующие зоны:

а) заповедная зона, предназначенная для сохранения природной среды в естественном состо-

янии, в границах которой запрещается осуществление любой экономической деятельности;

б) особо охраняемая зона, предназначенная для сохранения природной среды в естественном состоянии, в границах которой допускаются проведение экскурсий, посещение в целях познавательного туризма;

в) рекреационная зона, предназначенная для обеспечения и осуществления рекреационной деятельности, развития физической культуры и спорта, а также размещения объектов туристской индустрии, музеев и информационных центров;

г) зона охраны объектов культурного наследия народов Российской Федерации, которая предназначена для сохранения указанных объектов и в границах которой допускается осуществление необходимой для их сохранения деятельности, а также рекреационной деятельности;

д) зона хозяйственного назначения, в границах которой допускается осуществление деятельности, направленной на обеспечение функционирования государственного учреждения, осуществляющего управление национальным парком, и жизнедеятельности граждан, проживающих на территории национального парка;

е) зона традиционного экстенсивного природопользования, которая предназначена для обеспечения жизнедеятельности коренных малочисленных народов Российской Федерации и в границах которой допускается осуществление традиционной хозяйственной деятельности и связанных с ней видов неистощительного природопользования.

При проведении зонирования, однако, не следует стремиться к возможно большему числу функциональных зон и излишне сложной системе зонирования, если только это не определяется особенностью природных условий и характером использования территории (Попов и др., 2001). Согласно практическим рекомендациям по созданию плана управления национального парка (Буйволов, 2002), процесс зонирования представляет собой итог сравнительной многопризнаковой оценки природных и историко-культурных комплексов на фоне определенной социально-экономической обстановки в окрестностях национального парка. Автор рекомендует в качестве объекта оценки брать природные территориальные комплексы (ПТК), отображаемые на ландшафтной карте, так как они обладают необходимой для оценки однородностью природных условий и свойств в пределах своих границ. Использовать все доступные материалы (литературные, фондовые и ведомственные), предложения ученых и специалистов, природоохранных ор-

ганизаций, данные специальных исследований. Выявлять и анализировать позиции заинтересованных сторон.

Целью данной работы является подготовка и обоснование предложений по функциональному зонированию территории Национального парка «Салаир» с учетом совмещения задач сохранения природных комплексов, поддержания традиционного уклада жизни и хозяйствования местного населения и развития рекреационно-туристической деятельности.

Материалы и методы исследования

Национальный парк «Салаир» был создан в 2020 г. в Алтайском крае, он располагается в восточной его части, вдоль административной границы с Кемеровской областью в Заринском, Тогульском, Ельцовском и Солтонском районах. Территория парка состоит из шести обособленных кластеров общей площадью 161220.8 га (в том числе 1005.47 га земель сельскохозяйственного назначения, включенных без изъятия их из хозяйственного использования), что делает данную ООПТ крупнейшей охраняемой территорией в Алтайском крае. В основном находясь на западном макросклоне Салаирского кряжа, окруженного освоенными степными и лесостепными ландшафтами, национальный парк способствует сохранению его уникальных и типичных ландшафтов: низкогорной черневой тайги с неморальным реликтовым широколиственным лесом; реликтовых рощ липы сибирской; массивов старовозрастных кедров; заболоченных смешанных лесов и т.д. (Грибков и др., 2015; Золотов и др., 2019; Быков и др., 2021; Зяблинцева и др., 2022).

Помимо многообразия природных комплексов, территория Национального парка «Салаир» интересна своим историко-культурным наследием, здесь присутствуют исторические объекты XVII–XVIII веков: места первых русских поселений в регионе, «Екатерининский тракт», объекты восточной части Колывано-Кузнецкой оборонительной линии.

Важная особенность национального парка – это его кластерность. Она обусловлена тем, что на планировавшейся изначально целостной территории были представлены интересы различных природопользователей, включая лесозаготовительные предприятия, пользователей недр, охотпользователей и других. К моменту организации ООПТ федерального значения некоторые рассматриваемые участки были переданы в долгосрочную аренду и пользование, а характер их эксплуатации был несовместим с законодательными требованиями к национальному парку. На



Рис. 1. Постройки и другие хозяйственные объекты, обнаруженные на спутниковом снимке высокого разрешения в кластере «Антроп» Национального парка «Салаир»

Fig. 1. Buildings and other economic objects found on a high-resolution satellite image in the «Antrope» cluster of the National Park «Salair»

этапе согласования границ данные участки были исключены из охраняемой территории, и единая площадь оказалась фрагментирована на шесть изолированных кластеров.

Кластерность Национального парка «Салаир» не только осложняет задачи охраны и управления, но и налагает существенные ограничения на пространственную организацию его территории, включая функциональное зонирование. Площадь разных кластеров парка сильно различается. Если самый большой участок «Тогул» занимает 113053.4 га (70.1% от общей площади), то самый маленький участок «Чумыш» – только 463.3 га (0.3%).

Минимизация издержек кластерной модели и малой площади отдельных участков национального парка видится в создании в дальнейшем охранной (буферной) зоны вокруг его внешних границ. Это позволит уменьшить негативное антропогенное воздействие извне и купировать «краевые» эффекты для охраняемых природных комплексов.

Подготовка схемы функционального зонирования Национального парка «Салаир» началась еще на этапе проектирования. Однако, за 2 года существования парка объем сведений о территории, включая данные о ценных природных комплексах и хозяйственных объектах, значительно увеличился.

Сбор информации для обоснования функциональной структуры парка включал 3 этапа: предполетные, полетные и камеральные работы. Предполетные работы включали анализ литературных и картографических источников, данных дистанционного зондирования Земли по общедоступным космическим снимкам высокого и

среднего разрешения. По их итогам был составлен предварительный перечень хозяйственных объектов, находящихся на территории и в непосредственной близости от границ Национального парка «Салаир», определен их контур и назначение. На данном этапе был подготовлен ГИС-проект, включающий следующие базовые и тематические слои:

- топографическая основа (исходный масштаб: 1:200000; 1:100000; 1:50000);

- гидрографическая сеть территории Национального парка «Салаир»: реки и другие постоянно и временно действующие водотоки, а также озера и болота;

- лесохозяйственные границы (лесные кварталы и лесотаксационные выделы по материалам последнего лесоустройства);

- дорожная сеть по данным топографических карт разных лет и масштабов, а также по данным материалов лесоустройства;

- существующая дорожная сеть, выявленная по данным дистанционного зондирования Земли (результаты визуального дешифрирования спутниковых снимков высокого разрешения Esri, Google и др.);

- хозяйственные объекты по данным дистанционного зондирования Земли – визуального дешифрирования спутниковых снимков высокого разрешения Esri, Google, и др.: дома, хозяйственные постройки, таежные избышки, пасеки, сенокосы, бывшие прииски и т.п. (рис. 1);

- ценные природные объекты, в том числе точки нахождения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений, лишайников и грибов, занесенных в Красную книгу Алтайского края и Красную книгу Российской Федерации.

Таким образом, камеральным способом была собрана и оцифрована основная информация о природных ценностях и хозяйственном использовании территории Национального парка «Салаир». Далее была необходима ее верификация на местности. Кроме того, оставались «белые пятна» с недостатком информации, которые требовали полевой проверки, например, был не ясен масштаб и характер использования территории кластера «Антроп», населяющими его старообрядцами.

Для уточнения имеющихся и сбора новых данных были произведены полевые обследования

территории национального парка и прилегающих участков, главным образом кластеров «Сары-Чумыш» и «Антроп», как наименее изученных. Обследованы хозяйственные объекты, произведено их фотографирование и картирование. Проведен опрос проживающего в парке и вблизи его границ населения о размещении объектов, их назначении и особенностях использования. Выявлены места традиционного природопользования – отдыха, рыбалки, сбора кедровых орехов, грибов, ягод, пищевых и лекарственных растений, сенокосения, выпаса сельскохозяйственных животных, размещения пасек, заготовки валежника, расположения существующих и потенциальных (с учетом транспортной доступности) мест заготовки дров.

На следующем этапе была произведена камеральная обработка, обобщение и оцифровка материалов дистанционного зондирования, данных полевых обследований, опросных сведений и прочих источников информации.

Проведенная комплексная оценка территории дала возможность предварительно обосновать функционально-режимную структуру Национального парка «Салаир». Уточнение границ зон проходило с учетом позиции всех заинтересованных сторон – хозяйствующих субъектов, органов местного самоуправления (включая администрации граничащих с национальным парком сельских поселений) Заринского, Тогульского, Ельцовского, Солтонского районов Алтайского края, Новокузнецкого района Кемеровской области (Загорское и Кузедеевское сельские поселения). Полученные от представителей органов местного самоуправления и жителей замечания и предложения были учтены при разработке проекта Положения о Национальном парке «Салаир».

Результаты и их обсуждение

В ходе анализа собранных материалов о ценных природных объектах и комплексах, видах, характере и масштабах хозяйственного использования территории, с учетом положений Федерального закона «Об особо охраняемых природных территориях», разработан проект функционального зонирования и проект режима особой охраны Национального парка «Салаир».

В границах парка, в соответствии с целями и задачами его создания, сложившимся историческим обликом ландшафтов и системой хозяйствования, предложено выделить четыре вида функциональных зон:

- заповедную зону;
- особо охраняемую зону;
- рекреационную зону;

– зону хозяйственного назначения.

Разработанная схема функционального зонирования представлена на рисунке 2. При проведении зонирования, в соответствии с рекомендациями (Попов и др., 2001), стремились к тому, чтобы границы зон проходили по хорошо выраженным на местности ориентирам – дорогам, руслам рек, квартальным просекам, существующим контурам разных видов природопользования и т. п.

Заповедная зона. Площадь 105734.5 га.

Заповедная зона составляет 65,6% от общей площади национального парка. Режим охраны заповедной зоны подразумевает полный запрет хозяйственной и рекреационной деятельности. Допускаются лишь научная (научно-исследовательская) деятельность, осуществление государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды), проведение природоохранных, биотехнических и противопожарных мероприятий, лесоустроительных и землеустроительных работ.

Стоит отметить, что соотношение площадей при выделении функциональных зон национальных парков никак не регламентируется действующим законодательством, однако, согласно рекомендациям МСОП, площадь заповедной зоны должна составлять примерно 75% (Dudley, Nigel, 2008; Борейко и др., 2018). По мнению Н.М. Забелиной (1987) и В.П. Чижовой (2006), установление каких-либо оптимальных пределов соотношения площадей отдельных зон недопустимо. При проведении функционального зонирования территории национального парка следует опираться на комплексную оценку территории, а не на формально установленное соотношение. Необходимо учитывать многие факторы, критерии и подходы. Важнейшие из них – природоохранная и историко-культурная ценность территории, рекреационные ресурсы и возможность их использования, социально-экономические условия, инженерно-строительная оценка территории (Буйволов, 2002). Соотношение размеров каждой зоны в различных национальных парках варьирует в очень больших пределах. Так, доля заповедной зоны в Национальном парке «Приэльбрусье» составляет 72.8%, а в «Русском Севере» – 1%. Однако это ни в коей мере не является показателем отношения к сбережению природных комплексов в данных ООПТ (Чижова, 2006; Иванова, 2012).

Преобладание площади заповедной зоны над другими обусловлено тем, что вся территория представляет собой уникальные природные комплексы таежных низкогорий, с присущим им ландшафтным и биологическим разнообразием, включающим реликтовые растения доледниково-

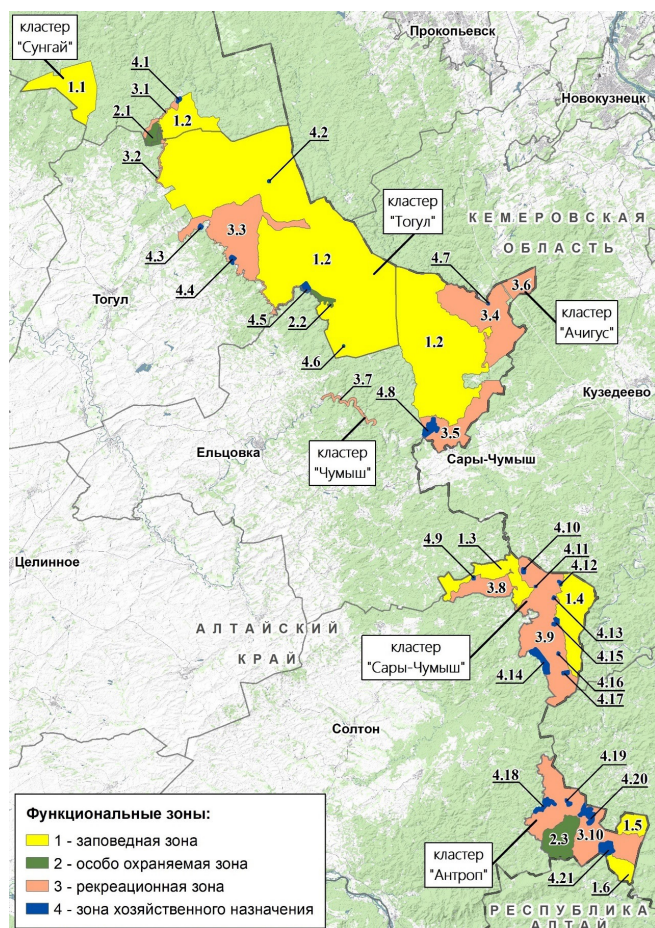


Рис. 2. Карта-схема функционального зонирования территории Национального парка «Салаир»
Fig. 2. Functional zoning of the National Park «Salair»

го периода, а также виды, внесенные в Красные книги различного уровня. В целом, специфика ландшафтов данной территории больше подходит под статус заповедника, к тому же в 90-х гг. прошлого века планировалось создать в осевой части Салаирского кряжа Салаирский заповедник (Быков и др., 2021), но так как территория имеет освоенные локальные объекты, не позволяющие организовать заповедник, был создан национальный парк. В заповедную зону вошли участки, обладающие наибольшей природоохранной и естественно-научной ценностью, которая определялась на основании встречаемости редких и реликтовых видов живых организмов, эталонных и уникальных природных объектов, и комплексов с минимальной антропогенной нарушенностью.

Несмотря на то, что местами на части территории велись рубки леса и добыча россыпного золота, хозяйственная деятельность человека не разрушила природные комплексы полностью, и для содействия их восстановлению они были включены в границы национального парка. Некоторые нарушенные экосистемы были внесены в зоны со строгим режимом охраны для мониторинга их

восстановления, например, сукцессии черневой тайги после сплошных рубок. Кроме того, в заповедную зону вошла та часть территории парка, которая не используется в жизнеобеспечении населения, проживающего в границах парка и в окрестных населенных пунктах.

Особо охраняемая зона. Площадь 4000.8 га.

В особо охраняемую зону (2.5% от площади национального парка) включены участки, обладающие наибольшей естественно-научной и историко-культурной ценностью: уникальные природные комплексы, местонахождения палеонтологических объектов, представителей древних флор и фаун, ценные геологические объекты. Например, в особо охраняемой зоне находятся Липовая роща – участок произрастания реликтового вида липы сибирской (*Tilia sibirica*), Жениховское местонахождение силурийской флоры и фауны.

Возможность посещения таких участков обусловлена их высоким потенциалом с точки зрения познавательного туризма и экологического просвещения. В то же время они нуждаются в специальных мерах охраны. Таким образом, режим особо охраняемой зоны наилучшим образом отвечает задачам сохранения и щадящего использования данных объектов, допуская кратковременное (без длительных стоянок и ночлега) посещение туристами обустроенных маршрутов и экологических троп.

Отдельно стоит отметить, что в кластере «Антроп» в особо охраняемую зону вошли некоторые участки земель сельскохозяйственного назначения, включенные в парк без изъятия из хозяйственного использования. Данные участки не имеют собственников, владельцев или пользователей, и представляют собой части массива черневой тайги, в действительности непригодного для ведения сельского хозяйства. При этом они характеризуются наличием мест обитания редких и исчезающих видов растений и животных. Таким образом, необходимость какого-либо иного использования кроме кратковременного посещения данной территории отсутствует.

Ю.А. Буйволов (2002) отмечает, что проблема зонирования земель, включенных в границы национального парка без изъятия из хозяйственной эксплуатации, дискутируется. По данным автора, земли других пользователей могут относиться не только к хозяйственной зоне, но и к особо охраняемой зоне, что позволяет администрации национального парка более обоснованно контролировать природопользование на этих участках. Однако, в случае с земельными участками кластера «Антроп» никакого природопользования на этих

землях нет, поэтому их отнесение к особо охраняемой зоне вполне рационально.

Рекреационная зона. Площадь 49588.8 га.

Рекреационная зона занимает 30.7% от общей площади национального парка. В силу задач, возложенных на данную категорию ООПТ федеральным законом, это одна из важнейших функциональных зон, предназначенная для развития регулируемого туризма и отдыха. Но не меньшее значение данная зона имеет для реализации законных прав и интересов, удовлетворения насущных потребностей местного населения, проживающего в пределах парка и на прилегающих территориях.

Общие законодательные требования к режиму данной зоны позволяют не только создавать условия для рекреации, развивать туристическую инфраструктуру, но и осуществлять в ее границах щадящие виды неистощительного природопользования, такие как любительское рыболовство, заготовка и сбор гражданами недревесных лесных ресурсов, пищевых лесных ресурсов и лекарственных растений для собственных нужд, сенокосение и выпас сельскохозяйственных животных, пчеловодство.

Органичное сочетание элементов традиционного хозяйства и охраны природных комплексов в рекреационной зоне не только не противоречит смыслу и задачам национальных парков, но и является дополнительным важным ресурсом для развития туризма, а также (что еще важнее) служит гарантией вовлеченности и заинтересованности в этом деле местных сообществ. Именно при таких условиях национальный парк может рассматриваться не как ограничение или барьер для местной экономики, а как потенциал для устойчивого развития и взаимовыгодного сотрудничества с населением.

Перечисленные обстоятельства имеют особое значение еще и в силу того, что территория Национального парка «Салаир» имеет ряд ограничений для развития туризма. Во-первых, она не обладает ярко выраженной однозначной привлекательностью для туристов. Для стандартного рекреанта – это труднодоступная, удаленная тайга, без ярких «флаговых» объектов и достопримечательностей, а также очевидных аттрактантов. Во-вторых, большое количество кровососущих насекомых, особенности климата распределяют комфортное пребывание на территории по сезонам года (короткая золотая осень, немного весна, для отдельных видов отдыха – зима, летом – крайне лимитировано). В-третьих, стоит отметить относительную неразвитость дорожной сети, практически полное отсутствие туристиче-

ской инфраструктуры. Несмотря на все это, территория обладает предпосылками для развития устойчивого экологического туризма, развитие которого может опираться на приграничные к парку территории и окрестные населенные пункты (Зяблинцева, Черных, 2022).

Таким образом, в рекреационную зону были выделены участки, уже используемые местным населением и немногочисленными рекреантами для сбора пищевых лесных ресурсов для личных нужд, любительского рыболовства, сенокосения, выпаса скота и пчеловодства. Для отдыха и туризма используются участки ряда рек, пригодные для сплавов, например, территория кластера «Чумыш» полностью относится к рекреационной зоне, так как включает традиционные места сплавов, рыбалки и отдыха. Территория кластера «Ачигус» полностью относится к рекреационной зоне для обеспечения потребностей в природных ресурсах жителей населенных пунктов Новокузнецкого района Кемеровской области, граничащих с национальным парком. На территории кластера «Тогул» в рекреационную зону выделены доступные части долин основных крупных рек – Чумыша, Тогула, Уды, Уксуная и Среднего Уксуная, участок существовавшей в прошлом исторической дороги – «Екатерининского тракта», который используется населением окрестных деревень для проезда к местам собирательской рекреации, а также является перспективным туристическим объектом.

Все перечисленные традиционные виды природопользования и отдыха разрешены режимом охраны рекреационной зоны, разрешена также заготовка гражданами древесины для собственных нужд на основании договоров купли-продажи лесных насаждений.

Зона хозяйственного назначения. Площадь 1896.7 га.

В данную зону (1.2% от площади национального парка) вошли участки земель сельскохозяйственного назначения, в том числе предоставленные гражданам в аренду для ведения хозяйственной деятельности или находящиеся в собственности; места традиционного природопользования и жизнедеятельности проживающих на территории парка старообрядцев; участки, необходимые для осуществления деятельности самого парка. Режимом зон хозяйственного назначения допускается ведение личного подсобного хозяйства проживающими на территории гражданами, а также собственниками, владельцами и пользователями земельных участков, включенных в национальный парк без

изъятия из хозяйственной эксплуатации.

Участки зоны хозяйственного назначения располагаются преимущественно в урочищах, соответствующих бывшим деревням и поселкам, прекратившим свое существование в 60–80-х годах прошлого века. Границы зоны проведены по контурам используемых местным населением территорий, установленным при полевых обследованиях.

Расположение зон и типология функционального зонирования

По расположению зон с наиболее строгим режимом охраны (заповедная, особо охраняемая) А. Меллума (Меллума и др., 1982) разделяет модели функционального зонирования национальных парков на концентрические и свободные. При первом типе зонирования такая зона находится в центральной части ООПТ. При втором типе зонирование имеет мозаичный рисунок.

В.П. Чижовой (2006) выделяется 3 типа функционального зонирования: концентрический, линейный и полицентрический. Концентрический, или моноцентрический тип, когда заповедное ядро парка занимает один компактный участок, расположенный в центральной части. От центра к периферии в виде концентрических полос находятся другие функциональные зоны, причем в этом же направлении уменьшается строгость режима охраны и увеличивается антропогенная, в основном рекреационная, нагрузка.

Линейный тип зонирования характерен для парков, территория которых вытянута вдоль побережья моря, озера или крупной реки. В этом случае ближайшими к побережью функциональными зонами, как правило, являются зоны с наименее строгим режимом охраны. И наоборот, наиболее удалена от берега заповедная зона.

И третий тип, характерный для большинства парков России, – полицентрический. Ему соответствуют национальные парки, расположенные в районах старого освоения и не имеющие значительных по размеру и цельных массивов природных ландшафтов.

Также среди типов функционального зонирования выделяются одноядерные и многоядерные. Для национальных парков, образованных по американской модели, ядром являются заповедная и особо охраняемая зоны. Ядро парков, образованных по европейской модели, составляют зоны охраны историко-культурных объектов. Одноядерные ООПТ подразделяются на компактные и линейные, многоядерные – на линейно-узловые и дисперсные (Астанин, 2018).

Всего в Национальном парке «Салаир» выделено: 6 участков заповедной зоны; 3 участка осо-

бо охраняемой зоны; 10 участков рекреационной зоны; 21 участок зоны хозяйственного назначения (рис. 2). Однозначно определить тип зонирования парка нельзя, так как его территория состоит из шести обособленных кластеров, три из них полностью заняты одной зоной. Вся территория кластера «Сунгай» относится к заповедной зоне, кластеров «Чумыш» и «Ачигус» – к рекреационной зоне.

В кластере «Тогул» представлены все виды выделенных функциональных зон. Можно сказать, что центральное место занимает большое заповедное ядро, а к границам парка уменьшается строгость режима охраны, таким образом зонирование этого кластера одноядерное концентрическое. Границы заповедной и рекреационных зон здесь в основном идут по долинам рек, отделяющим непроходимый и непосещаемый массив черневой тайги от традиционных мест отдыха, собирательской рекреации и рыболовства. Хозяйственные зоны преимущественно ограничены безлесными урочищами (бывшие населенные пункты) вблизи границ парка.

Одна из заповедных зон кластера «Сары-Чумыш» включает участки долин рек Сары-Чумыш, Салма и Еловка. Другая заповедная зона кластера ограничена с запада реками Сары-Чумыш и Туяс, с востока – границами парка (водораздел бассейнов Сары-Чумыша и Кондомы). Зоны хозяйственного назначения расположены в местах размещения пасек и ведения личного подсобного хозяйства местными жителями.

В кластере «Антроп» особо охраняемая зона и две заповедные зоны располагаются в массивах черневой тайги в разных частях кластера. Рекреационная зона отделяется от зон с более строгим режимом рекрами, ручьями, гривами. Хозяйственные зоны здесь располагаются преимущественно по безлесным урочищам, именно в их пределах проживают и ведут хозяйственную деятельность старообрядцы.

Зонирование кластеров «Сары-Чумыш» и «Антроп» можно отнести к многоядерному дисперсному типу. Данный тип предполагает несколько заповедных зон, основанных на разнородных экологических узлах (Астанин, 2018).

Заключение

Ландшафтным и биологическим своеобразием Национального парка «Салаир», а также особенностями сложившегося природопользования на территории продиктован такой подход обоснования функционального зонирования, при котором большая часть парка (68.1% площади) занята экологическим ядром

(заповедной и особо охраняемой зонами), которые должны обеспечить сохранение природных комплексов экосистем черневой тайги, редких и находящихся под угрозой исчезновения видов растений и животных, реликтовых видов живых организмов и их сообществ.

Рекреационная зона занимает 30.7% от общей площади, а зона хозяйственного назначения – 1.2% от общей площади. Это позволит обеспечить природными ресурсами личные нужды местного населения, проживающего в окрестных населенных пунктах, и старообрядцев, проживающих на территории парка. В связи с относительно невысокой популярностью территории у туристов, выделенная рекреационная зона способна удовлетворить существующий спрос на рекреацию.

Таким образом, главная задача функционального зонирования Национального парка «Салаир» – обеспечить органичное, непротиворечивое совмещение строгой охраны природных комплексов и щадящего, неистощительного использования природных ресурсов местными сообществами. Обретение такого баланса – весьма непростая задача, но именно от ее решения зависит устойчивость и долгосрочный эффект выбранной модели территориальной охраны природы.

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИВЭП СО РАН, номер FUFZ-2021-0007.

Список литературы

1. Астанин Д.М. Типология функционального зонирования национальных и природных парков // Архитектон: известия вузов. 2018. №1. С. 62–79.
2. Буйволов Ю.А. Как создать план управления национального парка. Практические рекомендации. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2002. 127 с.
3. Борейко В.Е., Галущенко С.В., Парникоза И.Ю. Территории строгого природоохранного режима (категории I-a, I-b МСОП/IUCN). Международный и европейский опыт. Киев: Логос, 2018. 112 с.
4. Быков Н.И., Важов С.В., Гармс О.Я., Грибков А.В., Давыдов Е.А., Елесова Н.В., Зяблинцева М.В., Косачев П.А., Кузменкин Д.В., Маслова О.М., Пожидаева Л.В., Петров В.Ю., Сабаев А.А., Смирнова Л.Я., Черных Д.В., Щур А.В. Природные условия национального парка «Салаир» // Труды Тигирекского заповедника. 2021. №13. С. 7–45.
5. Грибков А.В., Кузменкин Д.В., Нехорошева Л.В., Щур А.В. Пути совершенствования системы особо охраняемых природных территорий Алтайского края // Труды Тигирекского заповедника. 2015. №7. С. 96–110. doi: 10.53005/20767390_2015_7_96.
6. Забелина Н.М. Национальный парк. М.: Мысль, 1987. 170 с.
7. Золотов Д.В., Кузменкин Д.В., Черных Д.В., Соломахин Д.Н., Грибков А.В. Рекомендации по выделению высоких природоохранных ценностей категории «Редкие экосистемы и местообитания» в лесах Алтайского края. Красноярск: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2019. 66 с.
8. Зяблинцева М.В., Кузменкин Д.В., Грибков А.В., По-

жидаева Л.В., Смирнова Л.Я., Яковченко Л.С., Горбунова И.А., Давыдов Е.А. Роль национального парка «Салаир» в сохранении видов, внесенных в Красную книгу Алтайского края // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №2. С. 33–46. doi: 10.24852/2411-7374.2022.2.33.46.

9. Зяблинцева М.В., Черных Д.В. Перспективы развития устойчивого экологического туризма в национальном парке «Салаир» и на прилегающей территории в сотрудничестве с местным населением // Экологический туризм: современные векторы развития. Екатеринбург, 2022. С. 411–416.

10. Иванова Е.А. Национальные парки России: функциональное зонирование // Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы / Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практ. конф. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2012. Ч. 2. С. 48–49.

11. Меллума, А.Ж., Рунгуле Р.Х., Эмсис И.В. Отдых на природе как природоохранная проблема. Рига: НПО «Силава» Латвийский НИИ лесохозяйственных проблем, 1982. 159 с.

12. Попов В.Л., Добрушин Ю.В., Максаковский Н.В. Как создать национальный парк. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2001. 23 с.

13. Стишов М.С., Дадли Н. Охраняемые природные территории Российской Федерации и их категории. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 248 с.

14. Федеральный закон «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 № 33-ФЗ // URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ (дата обращения: 10.01.2023).

15. Чинова В.П. Методика зонирования национальных парков // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2006. №3. С. 105–123

16. Dudley N. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. Switzerland: IUCN, 2008. 86 p.

17. Sheppard D. The New Paradigm for Protected Areas: Implications for Managing Visitors in Protected Areas // Exploring the Nature of Management / Proceedings of the Third International Conference on Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas. Switzerland: University of Applied Sciences Rapperswil, 2006. P. 33–45.

References

1. Astanin D.M. Tipologiya funktsional'nogo zonirovaniia natsional'nykh i prirodnnykh parkov [Typology of functional zoning of national and natural parks] // Arkhitekton: izvestiia vuzov [Architecton: news of universities]. 2018. No 1. P. 62–79.
2. Buivolov Yu.A. Kak sozdat' plan upravleniia natsional'nogo parka. Prakticheskie rekomendatsii [How to create a national park management plan. Practical recommendations]. Moscow, 2002. 127 p.
3. Boreiko V.E., Galushchenko S.V., Parnikoza I. Yu. Territorii strogo prirodooxrannogo rezhima (kategorii I-a, I-b MSOP/IUCN). Mezhdunarodny i evropejskij opyt [Territories of strict nature protection regime (IUCN/IUCN categories I-a, I-b). International and European experience]. Kiev: Logos, 2018. 112 p.
4. Bykov N.I., Vazhov S.V., Garms O.Ya., Gribkov A.V., Davydov E.A., Elesova N.V., Zyblyntseva M.V., Kosachev P.A., Kuzmenkin D.V., Maslova O.M., Pozhidaeva L.V., Petrov V.Yu., Sabaev A.A., Smirnova L.Ya., Chernykh D.V., Shchur A.V. Prirodnye usloviya natsional'nogo parka «Salair» [Natural conditions of the Salair National Park] // Trudy Tigirek'skogo zapovednika [Proceedings of the Tigirek State Natural Reserve]. 2021. No 13. P. 7–45.
5. Gribkov A.V., Kuzmenkin D.V., Nekhorosheva L.V., Shchur A.V. Puti sovershenstvovaniia sistemy osobo okhrani-

aemykh prirodnikh territorii Altaiskogo kraia [Ways to improve the system of specially protected natural territories of the Altai Territory] // Trudy Tigirekского zapovednika [Proceedings of the Tigirek State Natural Reserve]. 2015. No 7. P. 96–110. doi: 10.53005/20767390_2015_7_96.

6. Zabelina N.M. Natsional'nyi park [National park]. Moscow: Mysl', 1987. 170 p.

7. Zolotov D.V., Kuzmenkin D.V., Chernykh D.V., Solomakhin D.N., Gribkov A.V. Rekomendatsii po vydeleniuyu vysokikh prirodookhrannykh tsennostey kategorii «Redkie ekosistemy i mestoobitaniya» v lesakh Altaiskogo kraia [Recommendations on the allocation of high environmental values of the category "Rare ecosystems and habitats" in the forests of the Altai Territory]. Krasnoyarsk: Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF), 2019. 66 p.

8. Zyblyntseva M.V., Kuzmenkin D.V., Gribkov A.V., Pozhidaeva L.V., Smirnova L.Ya., Yakovchenko L.S., Gorbunova I.A., Davydov E.A. Rol' natsional'nogo parka «Salair» v sokhraneni vidov, vnesennykh v Krasnuiu knigu Altaiskogo kraia [The significance of the Salair national park for the protection of species listed in the Red book of the Altai territory] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 2. P. 33–46. doi: 10.24852/2411-7374.2022.2.33.46.

9. Zyblyntseva M.V., Chernykh D.V. Perspektivy razvitiia ustoychivogo ekologicheskogo turizma v natsional'nom parke «Salair» i na prilegaiushchei territorii v sotrudnichestve s mestnym naseleniem [Prospects for the development of sustainable ecological tourism in the national park «Salair» and the surrounding area in cooperation with the local population] // Ekologicheskii turizm: sovremennye vektory razvitiia [Ecotourism: modern vectors of development]. Ekaterinburg, 2022. P. 411–416.

10. Ivanova E.A. Natsional'nye parki Rossii: funktsional'noe zonirovaniye [National Parks of Russia: functional zoning] // Obshchestvo, sovremennaya nauka i obrazovanie: problemy i perspektivy [Society, modern science and education: problems and prospects] / Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konf. Tambov: OOO «Konsaltingovaya kompaniya Yukom», 2012. Part 2. P. 48–49.

11. Melluma A.Zh., Rungule R.K., Emsis I.V. Otdykh na prirode kak prirodookhrannaya problema [Outdoor recreation as an environmental problem]. Riga, 1982. 159 p.

12. Popov V.L., Dobrushin Yu.V., Maksakovskii N.V. Kak sozdat' natsional'nyi park [How to create a national park]. Moscow, 2001. 23 p.

13. Stishov M. S., Dadli N. Okhraniayemye prirodnye territorii Rossiiskoi Federatsii i ikh kategorii [Protected natural territories of the Russian Federation and their categories]. Moscow:

Vsemirnyi fond dikoi prirody (WWF), 2018. 248 p.

14. Federal'nyi zakon «Ob osobo okhraniayemykh prirodnikh territoriyakh» ot 14.03.1995 Vol. 33-FZ [Federal Law "On Specially Protected Natural Territories" dated 14.03.1995 No. 33-FZ] // URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ (accessed: 10.01.2023).

15. Chizhova V.P. Metodika zonirovaniia natsional'nykh parkov [Methodology of zoning of national parks] // Yuzhno-rossiiskii vestnik geologii, geografii i global'noi energii [South-Russian Bulletin of Geology, Geography and Global Energy]. 2006. No 3. P. 105–123

16. Dudley N. Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. Switzerland: IUCN, 2008. 86 p.

17. Sheppard D. The New Paradigm for Protected Areas: Implications for Managing Visitors in Protected Areas // Exploring the Nature of Management / Proceedings of the Third International Conference on Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas. Switzerland: University of Applied Sciences Rapperswil, 2006. P. 33–45.

Zyblyntseva M.V. On the issue of functional zoning of the National park «Salair».

The National Park «Salair» is a federal specially protected natural area created in 2020 in the Altai Territory. The article describes the characteristic features of the territory of the National Park «Salair», which are important in carrying out functional zoning. The proposals for functional zoning are substantiated, taking into account the combination of the tasks of preserving natural complexes, maintaining the traditional way of life and management of the local population and the development of recreational and tourist activities. The principles and approaches underlying the formation of the functional regime structure of the national park are disclosed, which should ensure an organic, consistent combination of strict protection of natural complexes and sparing, sustainable use of natural resources by local communities.

Keywords: National Park «Salair»; functional zoning; protection regime; nature protection; recreation.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 27.04.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 12.05.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 18.05.2023

Информация об авторе

Зяблинцева Маргарита Владимировна, аспирант, Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, E-mail: zyblyntseva.rita@mail.ru.

Information about the author

Margarita V. Zyblyntseva, postgraduate student, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya st, Barnaul, 656038, Russia, E-mail: zyblyntseva.rita@mail.ru.



CONTAMINATION OF LANDS AND HABITATS OF WILD UNGULATES BY EGGS AND LARVIES OF HELMINTHS OF THE STRONGYLATA SUBORDER

Different types of forest land are not the same, as are the places of circulation of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder. Plant formations with a low risk of infection are young pine forests, middle-aged and old pine forests, old mixed forests, spruce forests. Potentially dangerous in terms of infection are bushes of river floodplains and forest meadows. Plant formations with a high risk of infection are young mixed forests, middle-aged mixed forests with undergrowth. The most dangerous for infection are swampy forests and forest swamps. The degree of contamination and accumulation of invasive larvae of helminths of the Strongylata suborder in different lands and habitats is different and differs depending on the season of the year. The most favorable for mass infection is the end of summer, the beginning of autumn, namely August-September. The distribution of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in forest lands has a mosaic character. The number of plots depends on the areas preferred by wild ungulates. The movement of wild ungulates across the land occurs also under the influence of the anthropogenic factor, which affects the distribution of infection. If we know the habitats of wild ungulates, we can assess the degree of contamination by eggs and larvae of species and characterize the risk of infecting wild ungulates with them. The number of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement may vary over time depending on weather conditions. Infection with helminths of the suborder Strongylata occurs through the trophic links of wild ungulates. The addition of young grass vegetation to the diet of wild ungulates in spring leads to an increase in eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement. In the autumn season, when wild ungulates switch to rough forages, the number of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement decreases.

Keywords: contamination; helminths of the Strongylata; wild ungulates.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.27.37>

Introduction

The biosphere in the evolutionary-ecological time was structured by episodes of geographic and host colonization, which led to the spread of complex complexes of micro- and macroparasites, including circulating among vertebrates' helminths. Biological invasion is a complex phenomenon, often associated with «out-of-range dispersal» and the establishment of exotic (non-native) species and populations substantially outside their natural range (Hoberg, 2010). As a biotic factor, the state of populations of wild ungulates and their numbers are significantly affected by helminths of the suborder Strongylata. When studying the biological diversity of species of the suborder Strongylata, it was found that infection rates depend on the ecological characteristics of biotopes (Akhmedov et al., 2022). The most dangerous biotopes where wild boar is heavily contaminated with parasite germs are young pine forests, oak forests, birch forests, floodplain willow forests, alder forests, abandoned villages and mixed deciduous forests

(Penkevich, 2012).

When considering the influence of various risk factors on the prevalence of most genera of gastrointestinal tract nematodes, the highest were noted in roe deer from coastal areas, where climatic conditions are more favorable for the development and survival of third-stage larvae. In terms of animal sex, prevalence is generally higher in males than females, likely due to behavioral and physiological sex differences. On the contrary, no differences were found depending on the age of the animals (Pato et al., 2013). Exposure of wild animals to dangerous parasitic diseases often ends in death, loss of commercial qualities of meat and other products. They cause damage to the abundance of species and reduce the prestige of hunting game animals (Kokolova et al., 2019).

It has been established that individuals of wild ungulates of different species infested with helminths, including those belonging to the suborder Strongylata, have a significant decrease in slaughter rates with an increase in the content of bone and cartilage tissue

in carcasses. This indicates a decrease in meatiness at a high intensity of helminth invasion (Golubev, 2017). With regular monitoring of the parasitic ecosystem of game animals, it is possible to prevent their negative impact on public health. An important element of the epizootological analysis of this problem is the preservation of the species composition of wild game animals, an increase in their numbers (Kokolova et al., 2019), which is possible if a set of preventive veterinary measures aimed at maintaining the sanitary well-being of biocenoses is observed (Tretjakov et al., 2021). Measures to prevent strongylosis should be aimed at dispersing animals from dangerous to safe lands (Samoilovskaya, 2014).

Kristjanovski showed a comparative analysis of the intensity of strongylates infection of wild ungulates in protected areas without deworming and with deworming. He found that with a low infestation in the autumn period and without deworming in the spring, the infestation increases. Carrying out deworming reduces infection or heals. Routine deworming of wild ungulates kept in small protected areas is recommended. (Kristjanovski et al., 2021). In natural habitats, various species of strongylate pose a serious threat to the health and productivity of wild animals. Therefore, control of these parasites is necessary (Mutviri, 2013).

However, there is another point of view. With the transformation of wilderness into wilderness parks and the return of developed areas to the forces of nature, intermediate hybrid areas are emerging in which wilderness and managed nature are increasingly intertwined. The lack of intervention such as deworming allows these mixed territories to be left relatively unexplored (Claver, 2002). Human activity interferes with wild animals and results in the loss of many animal populations. It has been shown that deworming will negatively affect the intestinal microbiome of wild animals, significantly changing the number of microorganisms (Mustafa et al., 2021).

Thus, the question of the need to control the spread of helminths in the natural habitat remains controversial. However, the inclusion of deworming in the management of biological resources leads to indisputable benefits. This allows to reduce the antigenic load on the organism of animals, free them from helminths (for a while), and increase their resistance.

The aim of our work was a comparative ecological and helminthological assessment of the habitats of wild ungulates, regarding the sources of infection of the Strongylata suborder.

Materials and methods

Study Area and Data Collection

The work was carried out in the Osipovich experimental forestry. The forestry is located in the northern part of the Mogilev region of the Republic of Belarus. The area of forestry grounds is 45.7 thousand hectares, of which: 32.3 thousand hectares – forest, 10.5 thousand hectares – field, 2.9 thousand hectares – wetlands (fig. 1) from 2017 to 2019.

To determine the source of infection in the external environment we regularly examined the excrement of wild ungulates throughout all seasons.

Laboratory Assays

Excrement of wild ungulates was regularly examined during all seasons to establish the source of infection in the external environment. To do this, we used the Fülleborn method in the classical version and in modification (Jimenez-Albarran and Odda, 1994; Karmaliyev et al., 2017), and later, the McMaster test method in the original and in modification (Moriya, 1954; Cringoli et al., 2004). The Fülleborn method consisted in the fact that 3 g of excrement was first filled with water and left for a while. Then they were thoroughly crushed, the supernatant liquid was left until clear, and it was poured off. Washing was carried out several times. Then the sediment was microscopically examined for the presence of larvae and eggs of helminths.

The modification of the Fülleborn method was as follows: 3 g of excrement was preliminarily filled with water and left for 24 h. Filled with saturated salt solution and centrifuged at 3000 rpm for 15 minutes. The surface of the film was examined with a parasitological loop 5 mm in diameter. Three loops were taken from each sample and the average number of helminth eggs in the sample was calculated.

When using the Mac-Master test, the studies were carried out as follows: 3 g of feces were thoroughly mixed with water and filtered. The filtrate was placed in centrifuge tubes and centrifuged for 3 min. The supernatant was discarded and the precipitate was re-diluted with brine and thoroughly mixed. With a Pasteur pipette, the suspended sediment was collected from the test tube and filled with it into the McMaster chamber and microscoped at 10x4 lenses. Helminthes eggs and larvae were counted in the chamber.

When establishing the accumulation of larvae on plants, studies were carried out in all seasons. When evaluating the lands, the biomass of grass stand per unit area was considered. The average number of larvae per 1 g of vegetation was determined.

The sex of wild ungulates was determined by ex-

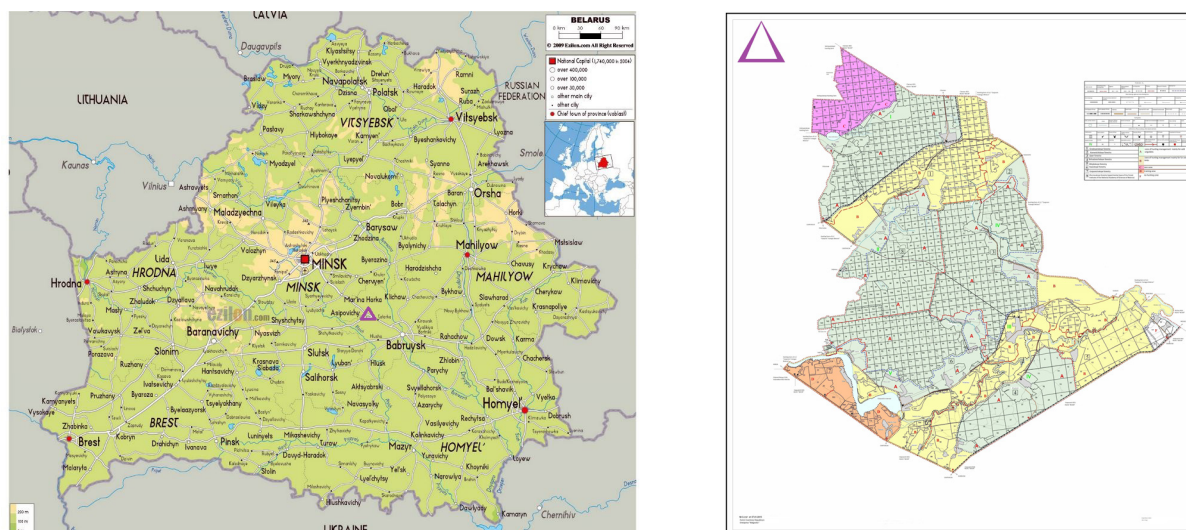


Fig. 1. Map of the location Osipovich experimental forestry (<https://disk.yandex.ru/i/4r6vEQzIBTW7A> open original)

crement according to (Romanov et al., 2005).

Data Analysis

The computational program used was Excel version 2010.

Results

Seasonal dynamics of environmental contamination by eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in the natural lands of the Osipovich Experimental Forestry

Climatic factors and weather conditions have a direct impact on the accumulation of eggs and the survival of larvae of helminths of the Strongylata suborder. In different seasons of the year, the number of allocated eggs is different.

It has been established that helminths are characterized by two periods with the greatest accumulation of eggs in excrement of female and male of wild ungulate. This is the spring (April-May) and autumn (September-October) periods. Less helminth eggs accumulate in late autumn, winter and early spring. In the event of a long warm autumn, warm winter with little snow cover, the number of eggs in excrement reaches a maximum in May (tab.1).

The presence of frosts and frequent snowfalls in spring leads to a delay in the grass cover development and reduction of accumulation of helminth eggs in excrement.

High humidity in autumn and high ambient temperature contributes to the abundant growth of herbaceous vegetation and, accordingly, increased survival of larvae of helminths of the Strongylata suborder.

Dry summer periods contribute to the active movement of larvae to plants, shifting the biological development cycle with a later infection of wild ungulates. Therefore, in autumn, the presence of eggs

and larvae in the excrement of wild ungulates was minimal. When the previous year is rainy, in spring the number of eggs and larvae in the excrement is small, and in summer, when there is an abundance of precipitation, it is high. When there is a period without precipitation, the number of larvae in the excrement decreases and remains low until early October. A warm autumn and snowless winter contribute to an increase in the number of helminth larvae in the excrement of wild ungulates. The maximum number is reached by the middle of winter. At the end of winter and beginning of spring, the number of helminth larvae in excrement decreases. With a warm beginning of spring, already at the end of March to mid-May, an increase in the number of helminth eggs in excrement is noted. Then their number decreases, remaining at the same level until mid-autumn, and then increases again. At the end of autumn and the beginning of winter, when low temperatures set in, the number of eggs and larvae of helminths decreases. So, in 2018, which was preceded by 2017 with high humidity, warm autumn and late snow cover, the spring peak of eggs and larvae in excrement was high in May. During the cold March with frosts, the grass growth was delayed. The number of helminth eggs of the Strongylata suborder was less than usual during this period. The accumulation of moisture in the autumn of the previous year led to an abundant grass growth in the spring and summer of the current year, which determined the high survival rate of larvae in all forest habitats (fig. 2).

The distribution of the infection of the Strongylata suborder of wild ungulates in natural lands in different periods of the season is not the same and is determined by weather conditions. The time and duration of periods of intensive accumulation of hel-

*Table 1. Introduction of helminths eggs of the Strongylata suborder
in wild ungulates into hunting lands*

Research period	January – February	March – April	April – May	May – June	Jun – July	July – August	August – September	September – October	October – November	November – December
Average number of eggs in 3 g of excrement	0.5	5.2	24.2	19.6	3.6	4.8	17.2	19.6	18.4	1.4
The number of helminth eggs in the excrement of females / day	1600	17140	82430	66820	10250	16810	62200	68780	65240	4480
The number of helminth eggs in the excrement of males / day	2520	25160	142320	104160	18640	24780	86200	105730	5880	6420

minth eggs in the excrement depends on the ecology of wild ungulates. An increase in the number of helminth eggs in excrement in spring begins after the appearance of young grassy vegetation. At the beginning of summer, wild ungulates are freed from helminths that got to them last autumn. Therefore, until the middle of summer, few eggs and larvae of helminths get into natural areas. There is no mass infection of wild ungulates with helminths at this time. Periodically occurring dry periods reduce the survival rate and movement activity of invasive larvae. In summer time, wild ungulates (*Cervus elaphus* and *Alces alces*) eat only the tops of herbaceous plants, which helps to prevent active infection in dry times. During the rainy season, wild ungulates spread out over the lands, which also protects them from mass infection. In spring, the intensity of the accumulation of invasion in excrement significantly depends on weather conditions. In autumn, wild ungulates switch to roughage, which also protects them from intense infection. In late autumn and winter, the alternation of snowy periods and periods without snow leads to fluctuations in the intensity of accumulation of helminth eggs of the Strongylata suborder in the excrement of wild ungulates.

Distribution of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in the natural lands of the Osipovich Experimental Forestry. Characterization of forest lands with respect to contamination by helminths of the Strongylata suborder of wild ungulates

The degree of contamination of lands with helminth eggs and larvae depends on the food and topical preferences of wild ungulates. Each landscape has its own peculiarities in the distribution of various species of wild ungulates. The degree of their preference and significance for wild ungulates in different

seasons of the year is different. In the conditions of the Osipovich experimental forestry, deer constantly live near feeding areas, salt licks and fodder fields, and heaps of excrement were mainly found near them.

Cervus elaphus and *Alces alces* prefer young pine forests, which are their winter feeding stations, therefore there, in early spring, contamination with eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder is the highest per unit area. There are almost the same numbers of them in the mixed forest.

Sufficiently high contamination of medium-aged mixed forests is observed. In the middle of spring, elk excrement was more often found in swampy forests along river floodplains, in mixed young forests, and also in young pine forests. It has been established that in winter with snow cover, there is a high contamination with eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder of the feeding habitats of the *Alces alces*. Low contamination is registered in winter in open areas and in light forests. In the spring, feeding habitats change and animals are redistributed. In spring, the number of eggs and larvae in the excrement is high, and the lands are heavily contaminated with wild ungulates. The highest concentration of them was noted in swampy areas of the forest and in mixed young forests. Almost wild ungulates visit forest and floodplain meadows, agrocenoses less frequently and their degree of contamination is insignificant. *Alces alces* avoids open areas of land, preferring forests.

For the circulation of helminths of wild ungulates of the Strongylata suborder, climatic conditions and geobotanical characteristics of the habitats of wild ungulates are important. This is confirmed by the study of the timing of their biological development,

the features of the physical activity of larvae and their survival in forest lands. This means that different types of forest land are not the same in terms of the places of circulation of helminths of wild ungulates of the Strongylata suborder.

The main habitats of wild ungulates, especially *Alces alces*, are young pine forests. In the winter season, a significant number of animals are concentrated there. At the same time, contamination with eggs of helminths of the Strongylata suborder is more than 69 thousand per 1 ha. While in the spring this indicator is more than 42 thousand per 1 ha. From late spring to the beginning of the autumn season, young pine forests are passing stations for wild ungulates, therefore eggs and larvae of helminths are rare there. In these plant formations, the height of the grass layer is low. Young pine forests can be attributed to lands with a low risk of infection with wild ungulate helminths of the Strongylata suborder. Middle-aged pine forests can also be classified as low-risk areas for wild ungulate helminth infestation, as they are predominantly resting and passing habitats for wild ungulates. The level of contamination in the winter season was more than 4.8 thousand per 1 ha, and in the spring more than 8.8 thousand per 1 ha. Old pine forests are only passing habitats and all year round. In the winter season, their contamination is 0.1 thousand per 1 ha, in the spring - more than 2.1 thousand per 1 ha. Therefore, this type of plant formations can also be attributed to lands with a low risk of infection. Young mixed forest formations with abundant motley grass are of high food value for wild ungulates (*Cervus elaphus* and *Alces alces*) in all seasons of the year. Contamination in the winter season here is more than 58.4 thousand eggs per 1 ha, in the spring season - more than 27.4 thousand. Therefore, this type of vegetation formations can be attributed to lands with a high risk of infection. Middle-aged mixed forests with deciduous undergrowth are frequently visited by wild ungulates in the winter season. Contamination there is up to 29.5 thousand per 1 ha. In other seasons, the forests of this formation are used by wild ungulates as food partially. In the spring season, contamination is 4.1 thousand per 1 ha. The grass cover is also abundant here. This type of formation can also be classified as a land with a high risk of contamination. Old mixed forests with sparse herbage are migratory habitats for wild ungulates and belong to lands with a low risk of contamination. Spruce forests with low herbage and sparse vegetation are lands with a low risk of contamination. In winter, swampy forests serve as passing and partially feeding habitats for *Alces alces*. Their contamination is 1.7 thousand eggs and larvae per 1 ha. In the spring season, the appearance of grassy vegetation in wetlands attracts

Alces alces. They are the richest in food, since the herbaceous cover is represented by plants, the height of which reaches the feeding layer and the *Alces alces* remains there throughout the summer-autumn season. Swampy forests with abundant vegetation are among the lands with a high risk of infection with helminths of the Strongylata suborder of wild ungulates. In the winter season, wild ungulates rarely visit the bushes along the river floodplain. During this period, contamination is less than 0.026 thousand per 1 ha. In the spring, visits to these habitats become more frequent, and contamination also increases to 3.5 thousand per 1 ha. In summer, the *Alces alces* changes its location, but these lands serve as feeding habitats for *Cervus elaphus* and *Capriolus capriolus*. Shrub thickets along the river floodplain belong to the lands with the risk of infection with helminths of the Strongylata suborder of wild ungulates. Contamination of forest meadows with helminths of the Strongylata suborder in winter and spring is low, although in the spring season these habitats are rich in food, and in the winter season they are rarely visited by wild ungulates. More often these habitats are visited by a *Cervus elaphus*. *Alces alces* usually avoid open areas and after using them as food, they move to forest lands. Forest meadows are dangerous in terms of infection with helminths of the Strongylata suborder for *Cervus elaphus* and potentially dangerous for *Alces alces*. Wild ungulates in different seasons of the year prefer to visit different lands. This preference depends on the availability of food at the habitats. Most preferred are habitats with abundant vegetation (mixed young growth, forest meadows). Features of the herbage of these lands are reflected in the mobility of larvae of helminths of the Strongylata suborder. Contamination with eggs of helminths of the suborder Strongylata per 1 ha in the spring period in a swampy forest can exceed that by more than 10 times in mixed young stands and more than 100 times in forest meadows (tab. 2).

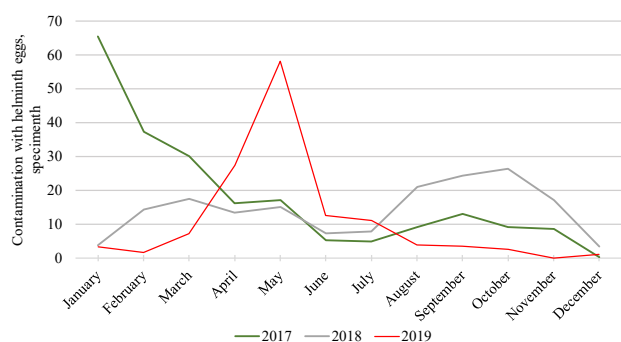


Fig. 2. Seasonal dynamics of contamination of wild ungulates by helminths of the Strongylata suborder

Table 2. Distribution of eggs of the Strongylata suborder
in lands and habitats of wild ungulates

Lands and habitats	Season of the year	
	Winter	Spring
	Number of eggs per 1 ha, ind.	
Forest meadow	0	4124
Swamp forest	172	486422
Young mixed forest	58442	27462
Medium aged mixed forest	29545	4168
Old mixed forest	42	0
Young pine forest	69284	42420
Middle-aged pine forest	4882	8865
Old pine forest	100	2146
Shrubs along the floodplain	26	3546
Agrocenoses	0	2436

Accumulation of larvae of helminths of the Strongylata suborder in the natural lands of the Osipovich Experimental Forestry

In forest lands, larvae of helminths of the Strongylata suborder accumulate on plant parts corresponding to the food layer of wild ungulates. The contamination degree of plants by larvae of helminths of the Strongylata suborder in habitats with dense herbage differs depending on the season of the year. The smallest contamination is observed in April and May. Then there is a gradual increase until the middle of summer. After a slight decrease is registered with an increase in early August. The maximum contamination of plants with larvae of helminths of the Strongylata suborder is recorded in September.

Different lands differ in the composition of vegetation, incl. biomass, especially depending on the season of the year. The maximum biomass is recorded in summer, especially in swamp parts of the forest. It is slightly less in meadow areas and old fellings. A significant biomass of herbaceous vegetation was

recorded in separate areas of pine forests, both middle-aged and old, in mixed young forests, as well as in areas with rare crown density. Insignificant biomass of herbaceous vegetation is in young pine forests and spruce forests. The accumulation of larvae of helminths of the Strongylata suborder in forest lands has a localized character. Their horizontal migration is negligible. It was established that the invasive larvae were mainly within a radius of 30 cm from the place of excrement excreted by wild ungulates. In a number of habitats, a significant number of such locations can be found per unit area (one heap - 0.5 m²) and mass number of infective larvae (tab. 3).

In this way, the infection of *Capriolus capriolus* and *Alces alces* with helminths of the Strongylata suborder in the habitats of this region can occur from mid-summer to early autumn (July-September) with a peak in the second half of August and the first half of September.

Differences in the biomass of herbaceous vegetation of forest formations determine their significance in relation to helminths of wild ungulates of

Table 3. Distribution of larvae of helminths of the Strongylata suborder
by habitats and areas (2017)

Habitats and lands	Biomass of herbage, g / 0.5 m ²	Number of larvae, ind. / 0.5 m ²
Forest meadow	1179.0	16152.0
Swamp forest	1600.0	6560.0
Old felling	1208.0	16504.5
Young pine forest	50.0	250.0
Middle-aged pine forest	342.5	3409.0
Old pine forest	96.7	3980.5
Old pine forest with dense herbage	388.0	15946.5
Young spruce forest	30.0	0
Old spruce forest	41.5	0
Young mixed forest	333.0	6357.5
Medium-aged mixed forest	300.0	1230.0
Old mixed forest	220.5	150.0

the Strongylata suborder, especially of the genus *Trichostrongylus*. The biomass of herbaceous vegetation in swamp forests exceeds by more than 5 times the biomass of mixed young forests and by 1.3 times the biomass of forest meadows. The activity of movement of larvae of helminths of the Strongylata suborder on the herbaceous vegetation of meadows is lower than that of forests, especially mixed young forests. The highest activity of the movement of helminth larvae is recorded in swampy forests with deciduous undergrowth and dense herbaceous vegetation. In the rainy and warm summer season, up to 21 larvae can be counted in 1 g of herbaceous vegetation in mixed forest areas, up to 5 larvae in swampy forests, and 11 larvae in forest meadows. At the same time, the safety and activity of the larvae is also very high.

It should be noted that anthropogenic impacts also have a significant impact on the ecology of the *Capriolus capriolus* (agricultural and active logging operations). Therefore, in the helminth fauna of the *Cervus elaphus*, there are species of the Strongylata suborder which are found at livestock. However, *Alces alces* most often choose small areas of swampy forests and forest swamps. In the summer season, females with young animals move over short distances. Their concentration in a limited area contributes to the presence of an increased risk of infection with helminths characteristic of this species. Unlike females, males are more dispersed geographically and the risk of infection is much lower.

Discussion

Historically, the role of parasites in the functioning of ecosystems was considered trivial, since a cursory examination reveals, that their relative biomass is low compared to other trophic groups. However, there is increasing evidence that parasite-mediated effects may be significant: they shape the dynamics of the host population, alter interspecific competition, affect energy flow and appear to be important biodiversity contributors (Hudson et al., 2006).

Pathogens and parasites are fascinating to epidemiologists and ecologists alike; as well as causing disease in individual species, they can perturb the normal functioning of a community and thus give insights into the way that the community 'functions'. Several recent studies on diseases in animal populations have confirmed the importance of pathogens and parasites as components of ecological systems, while also revealing the underlying structure of complex multispecies communities (Dobson, Hudson, 1986).

Shrinking ecosystems concentrate both individuals and species into restricted areas, promoting trans-

mission and exchange of parasites. Fragmentation increases edge and brings an influx of new species into the disturbed or agricultural habitats between fragments, introducing new parasites and possibly leading to the development of new and more pathogenic strains of parasite. Environmental contaminants act as stressors, and may compromise immune systems. Global climate changes challenge the adaptability of organisms, and may allow the invasion of new parasites. Because each of these effects increases the potential for parasites to become pathogenic, the importance of disease is expected to increase in shrinking ecosystems, with the emergence of new diseases and increasing numbers of epidemics. Increased pathogenicity of generalist parasites may pose a threat to species with restricted distributions or small populations (Holmes, 1996).

The host-parasite interaction is often seen as an arms race, when parasites try to overcome the host's resistance to infection. Herbivores are a common route of transmission for parasites, which represents the most common problem for the growth and reproduction of mammals. The starting point is that foraging seeking behavior can mitigate the impact of parasitism in three ways; hosts could: (1) avoid seeking foraging in parasite-infested areas; (2) choose diets that increase their resistance to parasites; (3) choose products that contain antiparasitic properties (self-medication). We know the skills required by herbivores if they want to fight parasitism through behavior, i.e. herbivores are capable: (a) determine their parasitic state and change their behavior in relation to this state (behavior 1, 2 and 3); (b) determine the spread of parasites in the environment (behavior 1); (c) distinguish plant species or plant parts that increase their resistance to parasites (behavior 2) or possess anti-parasitic properties (behavior 3). Herbivorous mammals cannot detect the presence of parasites themselves and must rely on such signals as feces. Despite the use of these signals, contact with parasites may be unavoidable, so mechanisms to combat parasitism are needed. Herbivorous mammals have the skills of finding foraging, necessary to exploit the heterogeneous distribution of nutrients and parasites in difficult foraging conditions, to avoid parasites and increase their resistance to them. Current evidence of the use of plant secondary metabolites (PSM) by herbivores for self-medication remains questionable (Hutchings et al. 2003).

When considering the influence of various risk factors on the prevalence of nematodes of the gastrointestinal tract of roe deer in the northwest of the Iberian Peninsula, the highest prevalence for most genera was observed in ungulates from coastal regions, where climatic conditions are more favorable for the

development and survival of larvae in the coastal zone (Pato et al., 2013).

Spatial heterogeneity in parasite susceptibility and exposure is a common source of mixed differences in disease ecology research. However, it is not known whether spatial autocorrelation affects immunity on small scales in wild animal populations and whether it predicts spatial infection patterns. Spatial heterogeneity is an important factor affecting immunity and parasitism in a wide range of research systems (Albery et al., 2019).

The type of habitat, as well as livestock, significantly influence the number of parasitic larvae in roe deer, which is higher in competitive scenarios and in lower quality environments (Horcajada-Sánchez et al., 2018).

Many of the parasites in mammals are acquired through contact with infected stages, which are present in soil, faeces, or vegetation, which makes it possible to assume, that behavior at a distance will have a great influence on their distribution (Nunn et al., 2011).

Parasitism in wild mammals can vary due to a variety of internal and external factors, many of which change with the season (Albery et al., 2018).

It is known that the burden of parasites in wild animals varies with the season, and precipitation is one of the key aspects of seasonality that is associated with parasitism in a number of systems. Rainfall can have a direct effect on parasitism levels, affecting the survival and movement of parasites in the environment (Shearer, Ezenwa, 2020).

They can influence the host's susceptibility to parasites through changes in the host's health condition (Marshall et al., 2008) or immune function (Fair, Whitaker, 2008).

The seasonal output of eggs of gastrointestinal parasites of wild ungulates of the Mediterranean protected area, in the Monti Livornesi park (Livorno, Tuscany region, Central Italy) showed, that egg output peaks in different months in accordance with different biology and parasite survival strategies (Magi et al., 2005).

Heavy rainfall may also improve survival and development of parasites in the environment (O'Connor et al., 2007, 2008).

Active soil ingestion is often observed in populations of wild mammals. Soil material is never eaten at random locations in animal's habitats, but from spatially limited areas (Klaus, Schmidg, 2009).

Helminth eggs were found more often in the soil of active and abandoned feeding sites than in control plots. This may reflect a parasitic infestation or indicate that, that supplementary feeding areas are appropriate habitats for soil-dwelling nematodes (Oja

et al., 2017).

A ubiquitous aspect of human intervention in forest landscapes is the edges of the forest. In mammals, the proportion of individuals with multiple infections is higher in edging forest groups than in inland forest groups. The prevalence of specific parasites varies between edging and intra-forest groups. *Oesophagostomum* sp., potentially dangerous parasite, was found in mammals at the edge of the forest 7.4 times more often than in the depths of the forest. Parasitic contamination (measured as parasite eggs/g faeces) of wild animals from edging and inland forest areas differed similar to the prevalence for one species, but did not differ for the other species. For example, the number of eggs of *Oesophagostomum* sp. in one species on the edge was 10 times higher than in another species from the inside (Chapman et al., 2006).

Therefore, wildlife health surveillance programs should include routine parasite screening, because gastrointestinal parasites can influence wildlife population dynamics, affecting fertility and survival of the host (Davidson et al., 2015).

Conclusion

Different types of forest land are not the same, as are the places of circulation of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder. Plant formations with a low risk of infection are young pine forests, middle-aged and old pine forests, old mixed forests, spruce forests. Potentially dangerous in terms of infection are bushes of river floodplains and forest meadows. Plant formations with a high risk of infection are young mixed forests, middle-aged mixed forests with undergrowth. The most dangerous for infection are swampy forests and forest swamps.

The degree of contamination and accumulation of invasive larvae of helminths of the Strongylata suborder in different lands and habitats is different and differs depending on the season of the year. The most favorable for mass infection is the end of summer, the beginning of autumn, namely August-September.

The distribution of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in forest lands has a focal character. The number of foci depends on the areas preferred by wild ungulates.

The movement of wild ungulates across the land occurs also under the influence of the anthropogenic factor, which affects the distribution of infection. If we know the habitats of wild ungulates, we can assess the degree of contamination by eggs and larvae of species and characterize the risk of infecting wild ungulates with them.

The number of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement may vary over time depending on weather conditions. Infection with

helminths of the suborder Strongylata occurs through the trophic links of wild ungulates. The addition of young grass vegetation to the diet of wild ungulates in spring leads to an increase in eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement. In the autumn season, when wild ungulates switch to rough forages, the number of eggs and larvae of helminths of the Strongylata suborder in excrement decreases.

Funding

The study was carried out with the financial support of the National Academy of Sciences of Belarus under assignment 2.02 «Territorial interference in the structural organization of the association of large mammal species on the territory of Belarus» of the State program of scientific research «Nature management and ecology», subprogram 2. «Biodiversity, bioresources, ecology» (grant number 20160501), as well with the support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research on the assignment «Peculiarities of dynamic processes and resistance mechanisms in populations of ungulate mammals in the zone of ecological optimum and on the periphery of the area» (grant number 20181087).

Data Availability Statement

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

We express our gratitude to Mikhail Shkutko, the leading engineer for hunting of the Osipovich Experimental Forestry, for his assistance in organizing the collection of material. We express our gratitude to the administration of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences for Bioresearches for the opportunity to carry out laboratory research.

References

1. Akhmedov M.A., Zubairova M.M., Ataev A.M., Karsakov N.T., Dzumlatov Z.M. Biological diversity of species of the suborder Strongylata Railliet et Henry, 1913 of the digestive tract of sheep in different ecosystems of the Tersko-Kuma lowland // *Veterinary doctor*. 2022. Vol. 3. P. 16–22.
2. Albery G.F., Becker D.J., Kenyon F., Nassey D.H., Pemberton J.M. The Fine-Scale Landscape of Immunity and Parasitism in a Wild Ungulate Population // *Integrative and Comparative Biology*. 2019. Vol. 59, No 5. P. 1165–1175. doi: 10.1093/icb/icz016.
3. Albery G.F., Kenyon F., Morris A., Morris S., Nassey D.H., Pemberton J.M. Seasonality of helminth infection in wild red deer varies between individuals and between parasite taxa // *Parasitology*. 2018. Vol. 145, No 11. P. 1410–1420. doi: 10.1017/S0031182018000185.
4. Chapman C.A., Speirs M.L., Gillespie T.R., Holand T., Austad K.M. Life on the edge: gastrointestinal parasites from the forest edge and interior primate groups // *American journal of primatology*. 2006. Vol. 68, No 4. P. 397–409. doi: 10.1002/ajp.20233.
5. Cringoli G., Rinaldi L., Veneziano V., Capelli G., Sciala A. The influence of flotation solution, sample dilution and the choice of McMaster slide area (volume) on the reliability of the McMaster technique in estimating the faecal egg counts of gastrointestinal strongyles and *Dicrocoelium dendriticum* in sheep // *Veterinary Parasitology*. 2004. Vol. 123, No 1–2. P. 121–131. doi: 10.1016/j.vetpar.2004.05.021.
6. Davidson R.K., Ličina T., Gorini L., Milner J.M. Endoparasites in a Norwegian moose (*Alces alces*) population – Faunal diversity, abundance and body condition // *International journal for parasitology: Parasites and Wildlife*. 2015. Vol. 4, No 1. P. 29–36. doi: 10.1016/j.ijppaw.2014.12.005.
7. Dobson A.P., Hudson P.J. Parasites, disease and the structure of ecological communities // *Trends in ecology & evolution*. 1986. Vol. 1, No 1. P. 11–15. doi: 10.1016/0169-5347(86)90060-1.
8. Fair J.M., Whitaker S.J. Avian cell-mediated immune response to drought Wilson // *Journal of ornithology*. 2008. Vol. 120. P. 813–819.
9. Golubev A.A. Ecological and epizootological monitoring of parasitoses of wild ungulates in the mountain zone of Kabardino-Balkaria [Ekologo-epizootologicheskij monitoring parazitov dikih kopytnyh zhivotnyh v gornoj zone Kabardino-Balkarii] // Summary of PhD (Cand. of Biol.) Moscow, 2017. 27 p.
10. Hoberg E.P. Invasive process, mosaics and the structure of helminth parasite faunas [Electronic resource] // *Revue scientifique et technique*. 2010. Vol. 29 (2). URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20919581> (accessed: 21.02.2023).
11. Holmes J.C. Parasites as threats to biodiversity in shrinking ecosystems // *Biodiversity & Conservation*. 1996. Vol. 5. P. 975–983. doi: 10.1007/bf00054415.
12. Horcajada-Sánchez F., Navarro-Castilla Á., Boadella M., Barja J. Influence of livestock, habitat type, and density of roe deer (*Capreolus capreolus*) on parasitic larvae abundance and infection seroprevalence in wild populations of roe deer from central Iberian Peninsula // *Mammal research*. 2018. V. 63. P. 213–222. doi: 10.1007/s13364-018-0354-4.
13. Hudson P.J., Dobson A.P., Lafferty K.D. Is a healthy ecosystem one that is rich in parasites? // *Trends in ecology & evolution*. 2006. Vol. 21, No 7. P. 381–385. doi: 10.1016/j.tree.2006.04.007.
14. Hutchings M.R., Athanasiadou S., Kyriazakis I., Gordon I.J. Can animals use foraging behavior to combat parasites? // *Proceedings of the Nutrition Society*. 2003. Vol. 62, No 2. P. 361–370. doi: 10.1079/pns.2003243.
15. Jimenez-Albarran M., Odda R. A coprological study of intestinal infections in Northern Morocco (provinces of Tangier, Tetuán and Larache) // *Revista de sanidad e higiene publica*. 1994. Vol. 68, No 3. P. 405–418.
16. Karmaliyev R.S., Sidiyov B.M., Murzabaev K. Invasion of ruminants with helminthes in West Kazakhstan and efficiency of anthelmintics // *European scientific conference*, 2017. P. 170–173.
17. Klaus G., Schmid B. Geophagy at natural licks and mammal ecology: A Review // *Mammalia*. 2009. Vol. 62, No 4. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/mamm.1998.62.4.482b/html> (accessed: 20.06.2022).
18. Klaver I., Keulartz J., van den Belt H. Born to be Wild: A Pluralistic Ethics Concerning Introduced Large Herbivores in the Netherlands // *Environmental ethics*. 2002. Vol. 24 (1). P. 3–21. doi: 10.5840/enviroethics200224138.
19. Khristianovsky P., Belimenko V., Platonov S., Grudin D., Malcev S. Helminthofauna of ruminants and solipeds in the Center for Breeding Steppe Animals «Orenburg Tarpaniya» // XXII International scientific conference energy management

of municipal facilities and sustainable energy technologies (EMMFT-2020). 2021. Vol. 244. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/20/e3sconf_emmft2020_02002.pdf (accessed: 21.02.2023).

20. Kokolova L.M., Gavrilieva L.Yu., Stepanova S.M., Dulova C.V., Romanov I.I. Research on parasitic diseases in game animals in the ecosystem of the Far North // Astrakhan bulletin of ecological education. 2019. No 5. P. 131–135.

21. Magi M., Bertani M., Dell'Omodarme M., Prati M.C., Poglayen G. Seasonal egg output of gastrointestinal parasites in wild ungulates in a Mediterranean area (Central Italy) // Hystrix the Italian journal of mammalogy. 2005. Vol. 16, No 2. P. 169–177.

22. Marshal J.P., Krausman P.K., Bleich V.C. Body condition of mule deer in the Sonoran Desert is related to rainfall // The Southwestern naturalist. 2008. Vol. 53. P. 311–318. Doi: 10.1894/CJ-143.1.

23. Moriya S. The reliability of the current diagnostic methods for the identification of helminth eggs // Parasitology. 1954. Vol. 44, No3–4. P. 300–303. doi: 10.1017/s0031182000018928.

24. Moustafa M.A.M., Chel H.M., Thu M.J., Bawm S., Htun L.L., Win M.M., Oo Z.M., Ohsawa N., Lahdenperä M., Mohamed W.M.A., Ito K., Nonaka N., Nakao R., Katakura K. Anthropogenic interferences lead to gut microbiome dysbiosis in Asian elephants and may alter adaptation processes to surrounding environments [Electronic resource] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-80537-1> (accessed: 21.02.2022).

25. Mutwiri G. L. Prevalence and Intensity of Infection with Gastrointestinal Parasites in Thomson's Gazelles on Marula Ranch in Kenya [Electronic resource] // University of Nairobi research archive. 2013. URL: <http://erepository.uonbi.ac.ke:8080/xmlui/handle/123456789/57895> (accessed: 21.02.2023).

26. Nunn C.L., Thrall P.H., Leendertz F.H., Boesch C. The spread of fecally transmitted parasites in socially-structured populations [Electronic resource] // PLOS ONE. 2011. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0021677> (accessed: 20.06.2022).

27. O'Connor L.J., Kahn L.P., Walkden-Brown S.W. Moisture requirements for the free-living development of *Haemonchus contortus*: quantitative and temporal effects under conditions of low evaporation // Veterinary parasitology. 2007. Vol. 150. P. 128–138. doi: 10.1016/j.vetpar.2007.07.021.

28. Oja R., Velström K., Moks E., Jokelainen P., Lassen B. How does supplementary feeding affect endoparasite infection in wild boar? // Parasitology research. 2017. Vol. 116. P. 2131–2137. doi: 10.1007/s00436-017-5512-0.

29. Pato F.J., Vázquez L., Díez-Baños N., López C., Sánchez-Andrade R., Fernández G., Díez-Baños P., Panadero R., Díaz P., Morondo P. Gastrointestinal nematode infections in roe deer (*Capreolus capreolus*) from the NW of the Iberian Peninsula: Assessment of some risk factors // Veterinary Parasitology. 2013. Vol. 196, No 1–2. P. 136–142. doi: 10.1016/j.vetpar.2013.01.027.

30. Penkevich V. A. Helminthological assessment of wild boar biotopes of the Polesye state radiation-ecological reserve // Scientific notes of the educational institution «Vitebsk Order of the Badge of Honor» State Academy of Veterinary Medicine. Vitebsk, 2012. Vol. 48, No 2. P. 13–15.

31. Romanov V.S., Kozlo P.G., Padajga V.I. Hunting science. Minsk, 2005. 448 p.

32. Samoilovskaya N.A. Factors influencing the formation of parasite fauna in wild ungulates in forest ecosystems of the central region of Russia // Russian parasitological journal. 2014. Vol. 1. P. 40–43.

33. Shearer C.L., Ezenwa V.O. Rainfall as a driver of seasonality in parasitism // International Journal for Parasitology:

Parasites and Wildlife. 2020. Vol. 12. P. 8–12. doi: 10.1016/j.ijpaw.2020.04.004.

34. Tretyakov A. M., Kiriltsov E. V., Chernih V. G., Boryaev G. I. Conservation of commercially hunted ungulates biodiversity in Transbaikalia by ensuring efficient veterinary measures [Electronic resource] // IOP Conference Series: earth and environmental science, Vol. 953, Volga Region Farmland, 2021. Penza, 2021. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/953/1/012042/pdf> (accessed: 01.02.2022).

Полоз С.В. Загрязнение земель и мест обитания диких копытных яйцами и личинками гельминтов подотряда Strongylata.

Различные типы лесных угодий неодинаковы как места циркуляции яиц и личинок гельминтов подотряда Strongylata. Растительными формациями с низким риском заражения являются сосновые молодняки, средневозрастные и старые сосновые леса, старые смешанные леса, ельники. Потенциально опасными по заражению являются кустарниковые заросли поймы рек и лесные луга. Растительными формациями с высоким риском заражения являются молодые смешанные леса, средневозрастные смешанные леса с подростом. Наиболее опасными по заражению являются заболоченные леса и лесные болота. Степень контаминации и накопление инвазионных личинок гельминтов подотряда Strongylata в различных угодьях и стациях различно и отличается в зависимости от сезона года. Наиболее благоприятными для массового инфицирования является конец лета, начало осени, а именно август-сентябрь. Распределение яиц и личинок гельминтов подотряда Strongylata в лесных угодьях имеет мозаичный характер. Количество площадок зависит от угодий, которые предпочитают дикие копытные. Перемещение диких копытных по угодьям происходит и под воздействием антропогенного фактора, что оказывает влияние на распределение инфекции. Зная места обитания диких копытных можно оценить степень контаминирования яйцами и личинками видов и охарактеризовать риск заражения ими диких копытных. Количество яиц и личинок гельминтов подотряда Strongylata в экскрементах может изменяться во времени в зависимости от погодных условий. Реализация заражения гельминтами подотряда Strongylata происходит через трофические связи диких копытных. Включение молодой травяной растительности в рацион диких копытных весной приводит к увеличению яиц и личинок гельминтов подотряда Strongylata в экскрементах. В осенний сезон при переходе диких копытных на грубые веточные корма количество яиц и личинок гельминтов по-

дотряда Strongylata в экскрементах снижается.

Ключевые слова: контаминация; гельминты
подотряда Strongylata; дикие копытные.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 31.01.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 11.05.2023

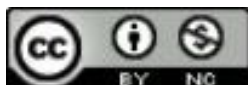
Принята к публикации / Accepted for publication: 18.05.2023

Сведения об авторе

Полоз Светлана Васильевна, кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, РУП «Институт рыбного хозяйства» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству», 220024, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Стебенева, 22, E-mail: lana.poloz@gmail.com.

Information about the author

Sviatlana V. Polaz, PhD in Veterinary Medicine, Leading Researcher, Fish Industry Institute by Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Animal Husbandry, 22, Stebenev st., Minsk, 220024, Belarus, E-mail: lana.poloz@gmail.com.



^{1,2}С.В. Александров, ¹А.В. Сташко

¹Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», hydrobio@mail.ru

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСОВ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА

Вислинский залив представляет собой трансграничную лагунную экосистему Балтийского моря, которая подвержена загрязнению из различных антропогенных источников. Для российской части акватории залива выполнена оценка качества вод на основе расчета индексов загрязненности – ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI за период 2007–2020 гг. Наибольший уровень загрязнения характерен для Восточного района и Приморской бухты, куда поступает сток р. Преголя и сточные воды Калининграда. Значения индексов демонстрировали схожую сезонную и многолетнюю изменчивость с максимумами в период наиболее эвтрофного состояния и «цветения» вод залива. Вселение моллюска-фильтратора *Rangia cuneata* отразилось на снижении ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI в 2013–2017 гг. С 2016 г., после введения в строй очистных сооружений г. Калининграда, отмечается улучшение качества вод в акватории Приморской бухты.

Ключевые слова: Вислинский залив; индексы загрязненности вод; динамика качества вод; эвтрофирование; очистные сооружения.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.38.44>

Введение

Мониторинг загрязненности поверхностных водных объектов включает обработку больших массивов пространственно распределенных данных, полученных за длительный период. С целью комплексной оценки результатов наблюдений выполняются расчеты индексов загрязненности, которые позволяют учитывать вклад анализируемых гидрохимических параметров в общий уровень загрязнения водного объекта. Долгое время для оценки состояния поверхностных вод применялся индекс загрязненности воды (ИЗВ) (Методические ..., 1988), с 2002 г. он был заменен на удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) (РД 52.24.643–2002). Основным отличием УКИЗВ является возможность использования при его расчетах большего количества гидрохимических параметров, а также учет и характеристика повторяемости и кратности превышений.

В международной практике мониторинга известны различные гидрохимические индексы, в том числе канадский индекс качества воды (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, CCME WQI) (CCME, 2017). Он используется для оценки состояния речных и озерных экосистем, а также прибрежных зон и лагун (Lumb et al., 2006; Teshome, 2020; Miyittah et al., 2020). В отличие от УКИЗВ, расчет CCME

WQI позволяет использовать не только гидрохимические показатели, по которым установлены нормативы, но и другие критерии, выбор которых обусловлен задачами исследования. Различия в методологии расчетов ИЗВ, УКИЗВ, CCME WQI обуславливают разнообразие возможных оценок состояния водных объектов при одновременном их использовании.

Вислинский залив Балтийского моря представляет собой вытянутую лагуну, отделенную от моря узким проливом, большая часть его акватории (496 км², 61%) расположена в пределах Калининградской области. В Восточный район залива поступает сток р. Преголя, формирующий основу пресноводного стока с территории России и Польши (Chubarenko, Margonski, 2008). Вислинский залив можно охарактеризовать как сильно опресненный морской водоем, в котором соленость варьирует от <1‰ в устьях рек до 6–8‰ у морского пролива, составляя в среднем 3–4‰. По классификации О.А. Алекина воды залива принадлежат к третьему типу натриевой группы класса хлоридных вод. В заливе наблюдается переход от углекислосодержащих вод через хлористо-кальциевые к хлористо-натриевым (Александров, 2010; Журавлева, Тшосиньска, 1971). Будучи трансграничным водоемом, залив испытывает загрязнение с польской и российской сторон. В восточной части залива находится Калининград-

ская агломерация с населением свыше 800 тыс. человек, сточные воды из которой поступают в Восточный район и Приморскую бухту. Вислинский залив испытывает сильное влияние вод Балтийского моря, особенно в Прибалтийском районе. Разнотипные природные и антропогенные условия формируют в заливе выраженную пространственную неоднородность гидрохимических показателей (Александров, Сташко, 2021).

Природные условия и многолетнее загрязнение биогенными элементами обусловили формирование в заливе высокоэвтрофной экосистемы, в которой в отдельные периоды наблюдалось «цветение» воды. Наибольшие уровни загрязнения и эвтрофирования вод характерны для Восточного района и Приморской бухты (Александров, 2011; Александров, Горбунова, 2012).

По результатам исследований гидрохимических показателей качества вод на российской части акватории Вислинского залива был сформирован значительный массив аналитических данных, который позволяет апробировать различные расчетные индексы для анализа динамики пространственной и многолетней загрязненности вод.

Материалы и методы исследования

В расчетах использовали данные мониторинговых исследований Вислинского залива, выполненных АтлантНИРО в безледный период (март–апрель – ноябрь–декабрь) 2007–2020 гг. Отбор проб воды осуществляли ежемесячно в подповерхностном слое (0–0.5 м) на 9 станциях, охватывающих российскую акваторию залива (рис. 1). Всего за указанный период проведено 98 съемок, выполнен анализ 870 гидрохимических проб по

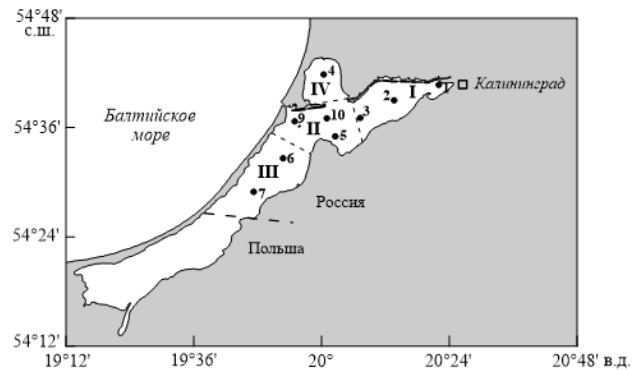


Рис. 1. Расположение станций отбора проб в Вислинском заливе

(I – Восточный, II – Прибалтийский, III – Центральный, IV – Приморская бухта (Александров и др., 2017))

Fig. 1. Location of the sampling stations in the Vistula Lagoon (I – Eastern region, II – Baltic region, III – Central region, IV – Primorsky Bay (Aleksandrov et al., 2017))

каждому исследуемому показателю. Полученные на каждой из станций значения гидрохимических показателей усредняли по районам: Восточному (станции №№ 1, 2, 3), Прибалтийскому (станции №№ 5, 9, 10), Центральному (станции №№ 6, 7) и Приморской бухты (станция № 4), которые отличаются физико-географическими и гидрологическими характеристиками (Александров и др., 2017). Гидрохимические исследования состава вод выполнялись стандартными методами (Руководство ..., 2003).

Расчет индекса загрязненности воды (ИЗВ) проводили по формуле для морской воды (Методические ..., 1988). Список показателей, кроме растворенного кислорода ($\text{ПДК}_{\text{рх}}$ 6.0 мгО/дм³), включал биохимическое потребление кислорода (2.1 мгО₂/дм³), фосфор фосфатов (200 мкгР/дм³) и аммонийный азот (400 мкгN/дм³). По этим показателям в Вислинском заливе периодически наблюдались превышения предельно допустимых концентраций. Эти же показатели были использованы для расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности вод (УКИЗВ) и индекса CCME WQI (РД 52.24.643–2002; CCME, 2017) (табл. 1).

Значения индекса CCME WQI получают путем расчета трех факторов: объема, частоты и амплитуды. Фактор объема определяется долей параметров, которые не соответствуют выбранным нормативам, его вклад в значение индекса является наибольшим. Частота отображает долю индивидуальных определений по-

Таблица 1. Характеристика загрязненности вод
Table 1. Characteristics of water pollution

Диапазон значений Measuring range	Характеристика загрязненности / качества воды Characteristics of pollution / water quality
ИЗВ	
≤ 0.25	Очень чистая
> 0.25 – 0.75	Чистая
> 0.75 – 1.25	Умеренно загрязненная
> 1.25 – 1.75	Загрязненная
УКИЗВ	
≤ 1	1 класс, условно чистая
> 1 – 2	2 класс, слабо загрязненная
> 2 – 3	3 класс, разряд «а», загрязненная
> 3 – 4	3 класс, разряд «б», очень загрязненная
CCME WQI	
94 – 100	Excellent (отличное)
80 – 94	Good (хорошее)
65 – 79	Fair / satisfactory (удовлетворительное)
45 – 64	Marginal / bad (низкое / плохое)

казателя, не соответствующих нормативу. Амплитуда характеризует степень отклонения значений гидрохимического показателя от норматива для тех значений, где наблюдаются превышения.

Результаты и их обсуждение

Индекс загрязненности воды

С 2007 по 2020 гг. среднегодовые значения индекса загрязненности вод в разных районах Вислинского залива варьировали от 0.55 до 1.04, а его воды характеризовались как чистые и умеренно-загрязненные. Наибольшие показатели загрязненности наблюдались в Восточном районе (от 0.63 до 1.04) и Приморской бухте (от 0.67 до 0.99), которые в среднем соответствовали умеренно-загрязненным водам (рис. 2).

Наибольший вклад в ИЗВ вносит биохимическое потребление кислорода (БПК₅), величины которого не соответствовали нормативам в 97% проб, при этом загрязненность вод оценивалась как «устойчивая».

В период с 2008 г. и до 2017 г. в Восточном районе и Приморской бухте, в отличие от других районов, отмечалось последовательное снижение загрязненности вод.

Особенностью сезонной динамики значений ИЗВ, осредненных за 2007–2020 гг., было наличие двух пиков: в апреле (в среднем 0.88), в июле и августе (0.85–0.90), которым соответствовало умеренно-загрязненное состояние вод. Самые низкие величины ИЗВ (до 0.60) характерны для периода, предшествующего ледоставу, когда качество вод соответствовало категории чистых (рис. 3).

Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды

С 2007 по 2020 гг. среднегодовые значения УКИЗВ в разных районах Вислинского залива варьировали от 1.46 до 3.64 с максимумами в Приморской бухте (1.84–3.64, в среднем 2.35). В других районах значения индекса были ниже, наблюдался и меньший диапазон их межгодовой изменчивости: в Восточном районе 1.60–2.67 (в среднем 2.00), Прибалтийском 1.55–2.08 (1.90), Центральном 1.46–2.09 (1.82) (рис. 4).

В Прибалтийском и Центральном районах значения индекса соответствовали слабо загрязненным водам (2-й класс), в Приморской бухте – загрязненным (3 класс, разряд «а»), а в Восточном районе – пограничному между загрязненными и слабо загрязненными (2.00). В 2008 г. в Приморской бухте воды характеризовались как очень загрязненные (3 класс, разряд «б»). Периодический рост УКИЗВ в Приморской бухте, который наблюдался вплоть до ввода в 2016 г. новых городских очистных сооружений, был связан с по-

ступлением в эту часть акватории недостаточно очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод г. Калининграда. В других районах динамика УКИЗВ носила более сглаженный характер (рис. 4).

Анализ сезонной динамики УКИЗВ в акватории Вислинского залива показывает, что с марта по август его значения держатся на уровне 1.91–2.06, затем наблюдается постепенное снижение индекса до 1.35–1.54, свидетельствуя об улучшении качества вод по исследованным показателям (рис. 3).

ССМЕ WQI

С 2007 по 2020 гг. в разных районах Вислинского залива среднегодовые значения индекса варьировали от 49 до 80. Наименьшие значения, соответствующие большему уровню загрязнения вод, отмечались в Приморской бухте (49–77, в среднем 70). В отличие от Приморской бухты, других районах залива индекс ССМЕ WQI колебался в более узком диапазоне: в Восточном районе от 62 до 79 (в среднем 75), Прибалтийском от 73 до 80 (77) и в Центральном от 73 до 80 (78) (рис. 5).

Значения ССМЕ WQI характеризуют качество вод залива в основном как удовлетворительное.

Сезонная динамика ССМЕ WQI выделяется наличием двух минимумов: в апреле и июле-августе, когда состояние вод оценивалось как удовлетворительное. Высокие значения индекса наблюдались в конце осени и начале зимы, что соответствовало пограничному состоянию вод между хорошим и удовлетворительным (рис. 3).

К недостаткам индексов ИЗВ, УКИЗВ и ССМЕ WQI обычно относят необходимость использования в их расчетах пороговых значений – предельно допустимых концентраций, которые со временем подвержены переоценке. Кроме того, результаты оценки могут сильно варьировать в зависимости от перечня выбранных показателей. Частной особенностью применения индексов, в расчет которых включены концентрации растворенного кислорода, является привязка к атмосферным процессам. Использование меньшего набора параметров приводит к увеличению веса каждого из них в индексе и, соответственно, влияет на оценку состояния вод.

В формуле расчета ИЗВ для морских вод используются 4 гидрохимических показателя, включая растворенный кислород (Методические ..., 1988). Оптимальным для расчета УКИЗВ является набор от 10 до 25 показателей, а обязательными являются 15 показателей (РД 52.24.643–2002). Индекс ССМЕ WQI рассчитывают минимум по 4 параметрам, но рекомендуемым является набор

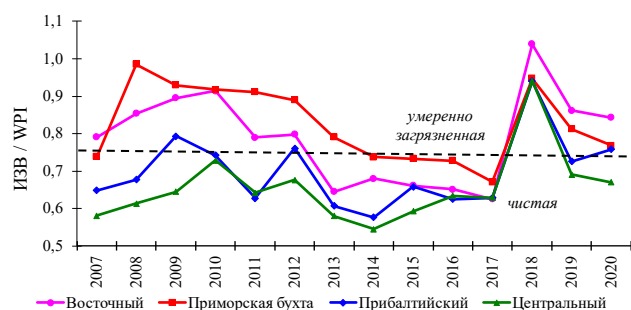


Рис. 2. Многолетняя динамика индекса загрязненности воды в разных районах акватории Вислинского залива в 2007–2020 гг.
Fig. 2. Long-term dynamics of the water pollution index in different areas of Vistula Lagoon in 2007–2020

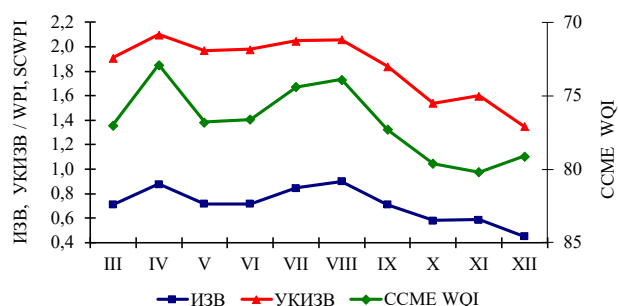


Рис. 3. Сезонная динамика величин ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI в акватории Вислинского залива в 2007–2020 гг.
Fig. 3. Seasonal dynamics of the values of the WPI, SCWPI and CCME WQI in Vistula Lagoon in 2007–2020

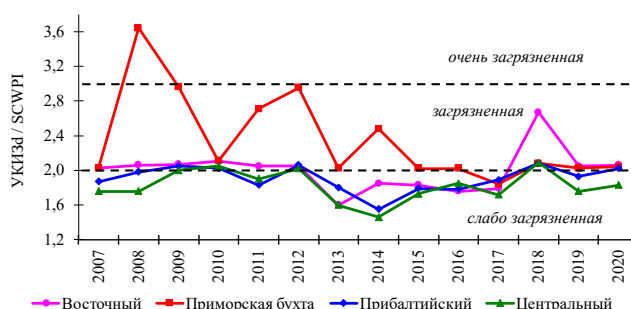


Рис. 4. Многолетняя динамика удельного комбинаторного индекса загрязненности вод в акватории Вислинского залива в 2007–2020 гг.
Fig. 4. Long-term dynamics of the specific combinatorial water pollution index (SCWPI) in Vistula Lagoon in 2007–2020

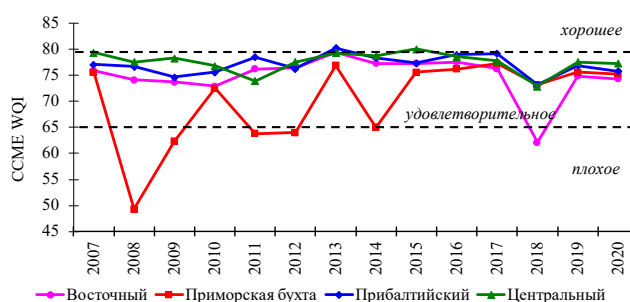


Рис. 5. Многолетняя динамика индекса CCME WQI в акватории Вислинского залива в 2007–2020 гг.
Fig. 5. Long-term dynamics of the CCME WQI in Vistula Lagoon in 2007–2020

от 8 до 20 (CCME, 2017).

В отличие от ИЗВ, при расчетах УКИЗВ и CCME WQI учитывается повторяемость случаев загрязнения, а для CCME WQI на итоговый результат также влияет фактор объема, значения которого изменяются даже при однократном превышении пороговых уровней при любом количестве определений.

Индексы загрязненности вод Вислинского залива характеризуются близкой динамикой (рис. 6). При этом УКИЗВ и CCME WQI более четко обозначают кратковременное локальное загрязнение, так как расчет амплитуды в них проводится только для показателей, значения которых находятся выше пороговых уровней. Индекс ИЗВ, в расчетах которого учитываются все показатели качества вод, включая те, значения которых находятся ниже ПДК, лучше характеризует устойчивость загрязнения.

В 2018 г. в заливе отмечался рост концентраций аммонийного азота. Это повлияло и на положительную динамику всех индексов загрязненности (рис. 6). Наибольшее количество биогенных элементов поступает в воды залива в паводковый

период, при смыве почв с водосборных территорий. Весной в заливе наблюдается небольшой рост численности и биомассы фитопланктона, следствием которого является увеличение содержания в воде легкоокисляемых органических соединений. В июле-августе развитие фитопланктона приобретает массовый характер, в основном за счет синезеленых водорослей, что обуславливает выраженную положительную динамику БПК₅ (Александров, 2010; Александров и др., 2017). В летний период прогрев мелководного залива и ветровое перемешивание водных масс ведут к значительному росту концентраций в воде фосфатов за счет их эмиссии из донных отложений. Осенью концентрации биогенных элементов варьируют в зависимости от термического режима, который складывается в акватории залива в зависимости от климатических условий года.

В целом гидрохимические и гидробиологические данные характеризуют Вислинский залив как эвтрофно-гипертрофный (Aleksandrov, 2010). До 2010 г. концентрации хлорофилла «а», как показателя обилия фитопланктона, в Восточном районе и Приморской бухте соответствовали ги-

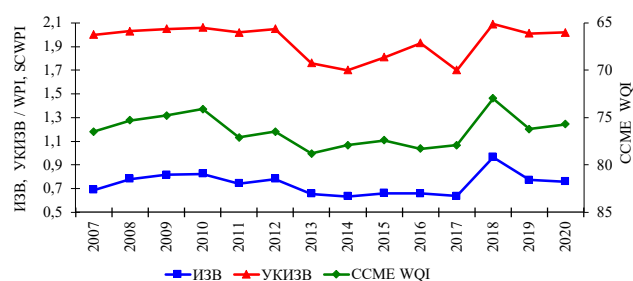


Рис. 6. Многолетняя динамика величин ИЗВ, УКИЗВ и CCMEWQI в акватории Вислинского залива в 2007–2020 гг.

Fig. 6. Long-term dynamics of the values of the WPI, SCWPI and CCME WQI in Vistula Lagoon in 2007–2020

пертрофному уровню. Отражением этого были высокие величины ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI.

Отмечаемое с 2010 г. массовое развитие в Вислинском заливе моллюска *Rangia cuneata* сильно отразилось на его экосистеме. При увеличении биомассы бентоса в 30 раз (до 800 г/м²) средняя за вегетационный период концентрация хлорофилла «а» в российской части залива уменьшилась в 2 раза: с 38 мкг/л в 2001–2010 гг. до 20 мкг/л в 2011–2017 гг. (Александров, 2018). Снижение численности и биомассы синезеленых водорослей, содержания хлорофилла, общего азота и фосфора наблюдалось в это же время и в польской части залива (Kownacka et al., 2020). Вселение моллюска-фильтратора способствовало значительному уменьшению концентрации в воде легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅), что также отразилось на величине индексов загрязненности.

Заключение

Вислинский залив представляет собой трансграничную лагуну Балтийского моря, которая подвержена различным видам антропогенного загрязнения. Наибольшие величины индексов ИЗВ, УКИЗВ и CCME WQI характерны для Восточного района и Приморской бухты, куда поступает речной сток р. Преголя и происходит сброс сточных вод г. Калининграда. При этом все индексы демонстрируют схожую сезонную и многолетнюю изменчивость.

Вселение моллюска *Rangia cuneata* положительно повлияло на качество вод в заливе в 2013–2017 гг. Введение в строй новых очистных сооружений в 2016 г. способствовало снижению показателей загрязнения Приморской бухты.

Благодарности. Гидрохимические исследования выполнены в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО» №076-00004-23-00, анализ пространственного распределения – госзадания ИО РАН

(тема № FMWE-2021-0012).

Список литературы

1. Александров С.В. Первичная продукция планктона в лагунах Балтийского моря (Вислинский и Куршский заливы). Калининград: АтлантНИРО, 2010. 228 с.
2. Александров С.В. Современное экологическое состояние и загрязнение Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Вода: химия и экология. 2011. №11. С. 3–9.
3. Александров С.В. Экологическое состояние Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование / Материалы Международной научно-практической конференции. Керчь: Ариал, 2018. С. 142–147.
4. Александров С.В., Вахрушева С.А., Мальфанов И.Л., Тренина Н.Е. Пространственные изменения гидрохимических показателей и солености воды в Вислинском заливе в 2010–2013 годах // Труды АтлантНИРО. 2017. Т. 1, №3. С. 33–64.
5. Александров С.В., Горбунова Ю.А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. №1. С. 90–98.
6. Александров С.В., Сташко А.В. Пространственное распределение и сезонная динамика биогенных элементов в Вислинском заливе в 2019 году // Известия КГТУ. 2021. №60. С. 11–21. doi: 10.46845/1997-3071-2021-60-11-21.
7. Журавлева Л.А., Тшосиньска А. Гидрохимический режим // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 219–262.
8. Методические рекомендации по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. М.: Госкомитет СССР по гидрометеорологии, 1988. 9 с.
9. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.
10. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
11. Aleksandrov S.V. Biological production and eutrophication of Baltic Sea estuarine ecosystems: the Curonian and Vistula Lagoons // Marine pollution bulletin. 2010. Vol. 61, №4–6. P. 205–210. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.015.
12. CCME Water Quality Index user's manual 2017. Update. URL: <https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf> (дата обращения: 05.11.2022).
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // Ecology of Baltic coastal waters. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 167–195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Kownacka J., Calkiewicz J., Kornijów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century // Oceanologia. 2020. Vol. 62, №4. P. 538–555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004.
15. Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie river basin, Canada // Environmental monitoring and assessment. 2006. №113. P. 411–429. doi: 10.1007/s10661-005-9092-6.
16. Miyittah M.K., Tulashie S.K., Tsyawo F.W., Sarfo J.K., Darko A.A. Assessment of surface water quality status of the Aby lagoon system in the western region of Ghana // Heliyon. 2020. Vol. 6, №7. P. e04466. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04466.

17. Teshome F.B. Seasonal water quality index and suitability of the water body to designated uses at the eastern catchment of Lake Hawassa // *Environmental science and pollution research*. 2020. Vol. 27, №1. P. 279–290. doi: 10.1007/s11356-019-06794-4.

References

1. Aleksandrov S.V. Pervichnaya produktsiya planktona v lagunakh Baltijskogo morya (Vislinskiy i Kurshskiy zalivy) [Primary plankton production in the Baltic Sea lagoons (the Vistula and Curonian lagoons)]. Kaliningrad: AtlantNIRO, 2010. 228 p.
2. Aleksandrov S.V. Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie i zagryaznenie Kurshskogo i Vislinskogo zalivov Baltijskogo morya [Current ecological state and pollution of the Curonian and Vistula lagoons of the Baltic Sea] // *Voda: himiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology]. 2011. No 11. P. 3–9.
3. Aleksandrov S.V. Ekologicheskoe sostoyanie Kurshskogo i Vislinskogo zalivov Baltijskogo morya [Ecological state of Curonian and Vistula lagoons of the Baltic sea] // *Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie* / *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Biological diversity: study, conservation, restoration, and rational exploitation / Proceedings of the international research and practice conference]. Kerch: Arial, 2018. P. 142–147.
4. Aleksandrov S.V., Vakhrusheva S.A., Malfanov I.L., Trenina N.E. Prostranstvennye izmeneniya gidrokhimicheskikh pokazateley i solenosti vody v Vislinskom zalive v 2010–2013 godakh [Spatial changes in hydrochemical parameters and water salinity in the Vistula Lagoon in 2010–2013] // *Trudy AtlantNIRO* [Works of AtlantNIRO]. 2017. Vol. 1, No 3. P. 33–64.
5. Aleksandrov S.V., Gorbunova Yu.A. Produktiya fitoplanktona i sodержanie hlorofilla v estuariyah razlichnogo tipa [Phytoplankton production and chlorophyll content in estuaries of various types] // *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*. [Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant]. 2012. No 1. P. 90–98.
6. Aleksandrov S.V., Stashko A.V. Prostranstvennoe raspredelenie i sezonnaya dinamika biogennykh elementov v Vislinskom zalive v 2019 godu [Spatial distribution and seasonal dynamics of biogenic elements in the Vistula Lagoon in 2019] // *Izvestiya KGTU* [KSTU news]. 2021. No 60. P. 11–21. doi: 10.46845/1997-3071-2021-60-11-21.
7. Zhuravleva L.A., Tshosin'ska A. Gidromicheskij rezhim [Hydrochemical regime] // *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva* [Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971. P. 219–262.
8. Metodicheskie rekomendatsii po formalizovannoy kompleksnoy otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Guidelines for a formalized comprehensive assessment of the quality of surface and sea waters by hydrochemical indicators]. Moscow: Goskomitet SSSR po gidrometeorologii, 1988. 9 p.
9. RD 52.24.643–2002. Metod kompleksnoy otsenki stepeni zagryaznenosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [A method for a comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters by hydrochemical indicators].
10. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskoy monitoringe rybnokhozyaystvennykh vodoyomov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana [Guidelines for the chemical analysis of marine and freshwater in the environmental

monitoring of fishery bodies of water and areas of the World Ocean promising for fishing]. Moscow: VNIRO, 2003. 202 p.

11. Aleksandrov S.V. Biological production and eutrophication of Baltic Sea estuarine ecosystems: the Curonian and Vistula Lagoons // *Marine pollution bulletin*. 2010. Vol. 61, No 4–6. P. 205–210. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.015.

12. CCME Water Quality Index user's manual 2017 Update. URL: <https://ccme.ca/en/res/wqimanualen.pdf> (accessed: 05.11.2022).

13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // *Ecology of Baltic coastal waters*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 167–195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.

14. Kownacka J., Calkiewicz J., Kornijów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, No 4. P. 538–555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004.

15. Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada // *Environmental monitoring and assessment*. 2006. No 113. P. 411–429. doi: 10.1007/s10661-005-9092-6.

16. Miyittah M.K., Tulashie S.K., Tsyawo F.W., Sarfo J.K., Darko A.A. Assessment of surface water quality status of the Aby lagoon system in the western region of Ghana // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, No 7. P. e04466. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04466.

17. Teshome F.B. Seasonal water quality index and suitability of the water body to designated uses at the eastern catchment of Lake Hawassa // *Environmental science and pollution research*. 2020. Vol. 27, No 1. P. 279–290. doi: 10.1007/s11356-019-06794-4.

Aleksandrov S.V., Stashko A.V. The use of water pollution indices to assess the long-term variability of the state of the Vistula Lagoon.

The Vistula Lagoon is a transboundary lagoon ecosystem of the Baltic Sea, which is subject to pollution from various anthropogenic sources. In 2007–2020 for the entire Russian water area of the lagoon, the calculation of the water pollution indices WPI and SCWPI and the CCME WQI was performed. The highest level of water pollution is typical for the Eastern region and Primorskaya Bay, where the river Pregolya runoff and sewage of Kaliningrad enter. The values of all indices in the lagoon showed similar seasonal and long-term variability with the highest values during the period of the most eutrophic state and the algae «bloom». The invasion of the filter-feeding mollusk *Rangia cuneata* resulted in a decrease in the values of the WPI, SCWPI and CCME WQI in 2013–2017. The commissioning of treatment facilities of Kaliningrad in 2016 led to a significant decrease in pollution of the Primorskaya Bay.

Keywords: Vistula Lagoon; water quality indices; water quality dynamics; eutrophication; treatment facilities.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 09.11.2022

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 19.04.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 24.04.2023

Информация об авторах

Александров Сергей Валерьевич, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», 236022, Россия, г. Калининград, ул. Дм. Донского, 5; старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., 36, E-mail: hydrobio@mail.ru.

Сташко Андрей Владимирович, старший инженер, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», 236022, Россия, г. Калининград, ул. Дм. Донского, 5, E-mail: hidanstashko@gmail.com.

Information about the authors

Sergey V. Aleksandrov, Ph.D. in Biology, Head of the Laboratory, Atlantic Branch of the FSBSI «VNIRO», 5, Dm. Donskoy st., Kaliningrad, 236022, Russia; Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, 36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia, E-mail: hydrobio@mail.ru.

Andrey V. Stashko, Senior Engineer, Atlantic Branch of the FSBSI «VNIRO», 5, Dm. Donskoy st., Kaliningrad, 236022, Russia, E-mail: hidanstashko@gmail.com.



В.С. Валиев, Д.В. Иванов, А.Т. Горшкова, О.Н. Урбанова, И.В. Мустакимова

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, podrost@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕРПОЛЯЦИИ РУСЛОВОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ КАЗАНКИ)

Анализируются возможности использования искусственной нейронной сети на парадигме многослойного персептрона для интерполяции значений русловых расходов воды по длине реки Казанки. Эксперимент продемонстрировал высокую эффективность полученной нейросетевой модели, которая оказалась точнее линейных и полиномиальных аппроксиматоров, традиционно используемых для решения подобных задач. Полученная модель может быть использована при оценках нормативно-допустимых сбросов на любом участке реки.

Ключевые слова: речной сток; моделирование; расходы воды, нейронные сети; река Казанка.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.45.48>

Введение

Развитие IT систем, методов машинного обучения, накопление значительных объемов данных многолетних наблюдений, а также общая стратегия цифровизации системы государственного экологического мониторинга в Российской Федерации формируют предпосылки к включению таких наиболее активно развивающихся в последние годы методов анализа данных как искусственные нейронные сети (ИНС) в состав инструментов научного исследования в области контроля за качеством окружающей среды.

Как и другие методы аналитических оценок, искусственные нейронные сети являются математическим алгоритмом преобразующим вектор входных сигналов X в вектор выходных сигналов Y . Отличием ИНС является то, что их функционирование основано на искусственном нейроне, который является ее ключевым структурным элементом и реализует преобразование сигнала, похожее на возбуждение нейрона в нервной ткани живых существ. Поэтому парадигма ИНС рассматривается в настоящее время как грубая, но реально функционирующая модель нервной системы человека (Круглов, Борисов, 2002). Области применения ИНС практически не ограничены и особенно актуальны при решении задач кластеризации, аппроксимации, классификации и прогнозирования.

Основные достоинства ИНС состоят в следующем: близость к природной реализации математического алгоритма, способность к адаптации, многоканальная система обработки информации,

устойчивость и стабильность функционирования за счет распределенного принципа расчетного алгоритма (Ясницкий, 2008).

В настоящем исследовании рассмотрена ИНС, реализующая наиболее часто востребованную в системах автоматизированных оценок модель интерполяции данных.

Материалы и методы исследования

В качестве нейросетевой парадигмы был использован персептрон на основе классического сигмоидального нейрона, запрограммированный на языке Object Pascal (Буч, 1992) в среде Delphi 7 (рис. 1).

Взвешенная сумма входных сигналов i -го нейрона вычисляется по формуле

$$u_i = \sum_{j=0}^N w_{ij} x_j$$

При этом взвешенная сумма входных сигналов u_i служит аргументом сигмоидальной функции активации $f(u_i)$, определяющей значение выходного сигнала y_i :

$$f(u_i) = \frac{1}{1 + \exp(-bu_i)}$$

Коэффициент b определяет крутизну графика функции и подбирается эмпирически.

Нами использовалась биполярная сигмоидальная функция, так называемый гиперболический тангенс, определенный в интервале $(-1; 1)$:

$$f(u_i) = \frac{2}{1 + \exp(-2bu_i)} - 1$$

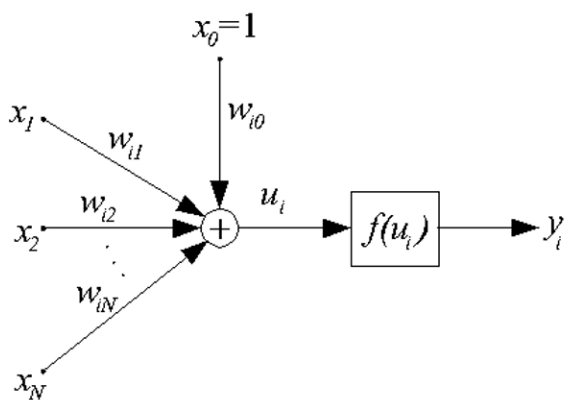


Рис. 1. Структура нейрона ИНС:

x_1, x_2, x_3, x_N – вектор входных сигналов (синапсы);
 x_0 – смещение, синапс с постоянным значением
равным 1; w_i – весовые коэффициенты синапсов;
 u_i – взвешенная сумма входных сигналов;

y_i – выходной сигнал; $f(u_i)$ – функция активации

Fig. 1. Artificial neural network's structure:

x_1, x_2, x_3, x_N – vector of input signals (synapses);
 x_0 – offset, synapse with constant value equal to 1;
 w_i – weight coefficients of synapses; u_i – weighted
sum of input signals; y_i – output signal;
 $f(u_i)$ – activation function

Производная сигмоидальной функции активации, позволяющая представить ее в виде колоколообразной кривой, имеет вид:

$$\frac{df(u)}{du} = bf(u)(1 - f(u))$$

Производная гиперболического тангенса, соответственно:

$$\frac{df(u)}{du} = b(1 - f^2(u))$$

Реализовано обучение нейронов «с учителем». В этом случае им предъявляют набор пар векторов $\langle X^k, Y^k \rangle$, где k – число пар в наборе «значение входа – ожидаемое значение выхода», то есть обучение с учителем предполагает априорное знание о соответствии значений выхода тем или иным входным сигналам.

В итоге группы нейронов представленной модели формируют слои, а слои – однонаправленную сеть, многослойный персептрон (Multilayer Perceptron), обученный методом обратного распространения ошибки (error backpropagation), сутью которого является коррекция синаптических весов, минимизирующая различие между рассчитанным выходом сети и его эталонным значением, осуществляемая в обратном направлении – от выхода сети к ее входу (Хайкин, 2006).

Результаты и их обсуждение

Задача, решаемая разработанной ИНС, состоя-

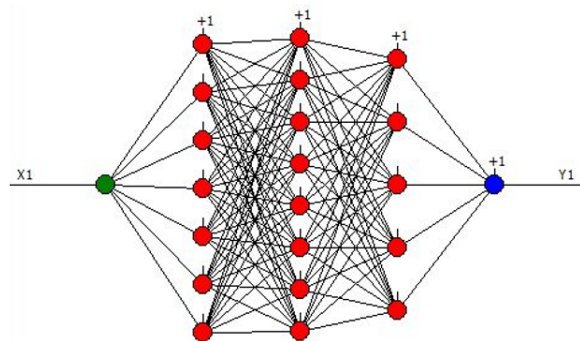


Рис. 2. Структура ИНС (зеленым цветом показан входной слой, красным – скрытые слои, синим – выходной слой, +1 – нейрон смещения)
Fig. 2. The structure of the artificial neural network (green – input layer, red – hidden layers, blue – output layer; +1 – bias neuron)

ла в построении кривой распределения руслового стока р. Казанки. Так как протяженность реки составляет всего 140 км, а ее водосбор вовлечен в активную хозяйственную деятельность, то знание о значениях расхода воды по всей протяженности русла, особенно меженного уровня (50%-ой обеспеченности), является необходимым условием грамотной и эффективной оценки критических пределов кратности разбавления антропогенных стоков.

В качестве обучающих данных использовались результаты среднемноголетних меженных расходов на разных участках реки. Обучающий набор включал 50 пар замеров расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) с привязкой по длине русла р. Казанки (расстояние от устья, км). Данные рядов предварительно нормализовались методом Min-Max:

$$X = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

где X – нормализуемое значение, $X_{\min}$ – минимальное значение ряда, $X_{\max}$ – максимальное значение ряда.

В результате эмпирического подбора параметров сети наиболее эффективной топологией ИНС для решения данной задачи была признана следующая.

Многослойный персептрон, с одним входом, тремя скрытыми слоями и одним выходом. Структура скрытых слоев: 7 нейронов в первом, 8 – во втором и 5 нейронов в третьем слое. Функция активации – гиперболический тангенс, скорость обучения – 0.01, крутизна – 1, импульс (инерция) сети – 0.7 (рис. 2).

ИНС использовала прямые связи, обеспечивающие передачу сигнала только по направлению от входа к выходу. Обучение сети осуществлялось методом обратного распространения ошибки, ко-

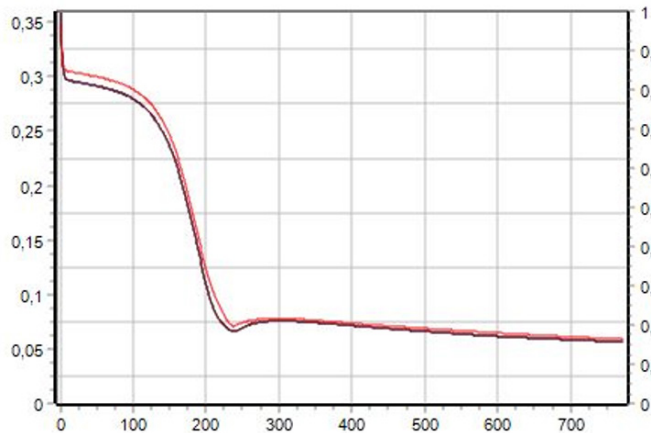


Рис. 3. График снижения ошибок целевой функции: красная кривая – тестовая выборка, черная – обучающая, ось X – число прошедших эпох обучения, Y – значение ошибки

Fig. 3. Error reduction graph of the objective function: red curve – test sample, black – training, X-axis – the number of training epochs passed, Y-axis – the error value

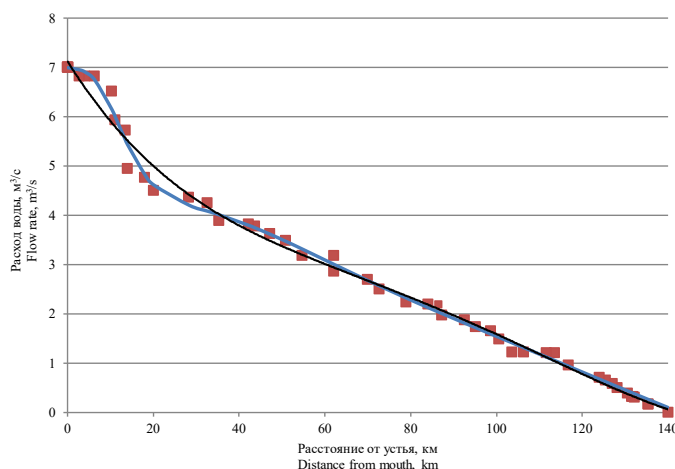


Рис. 4. Результат интерполяции значений расходов воды по длине р. Казанки

Fig. 4. The result of interpolation of the values of water discharge along the length of the Kazanka river

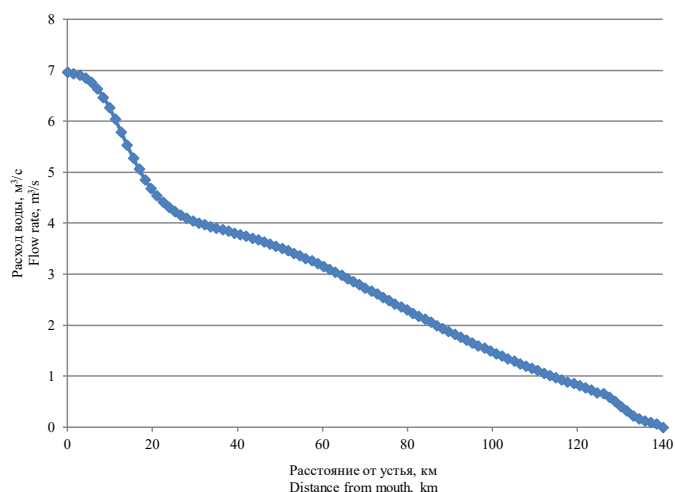


Рис. 5. График изменения расходов воды в р. Казанке

Fig. 5. Graph of changes in water consumption in the Kazanka river

торое контролировалось с помощью расчета ошибки между эталонным (целевым) y и фактическим (рассчитанным) y' выходом модели на обучающей выборке длиной N :

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2$$

Успешность обучения сети определялась по снижению рассчитываемой по каждому циклу обучения (эпохе) ошибки, и, когда снижение ошибки прекращалось, а ее значение оказывалось достаточно малым, сеть считалась обученной (рис. 3).

В связи с тем, что решалась задача интерполяции и переобучение сети было не критичным, один и тот же ряд наблюдений использовался и в обучающей, и в тестовой выборках.

В результате удалось получить модель, охватывающую ряд наблюдений за расходом воды в р. Казанке с высокой точностью ($R^2=0.94$). Для сравнения, коэффициент детерминации линейной модели $R^2=0.68$, а наиболее подходящей полиномиальной (полином 5 степени) $R^2=0.85$ (рис. 4).

На рисунке 4 показан результат интерполяции значений расходов воды (m^3/s) по всей длине р. Казанки: синяя кривая рассчитана ИНС, черная – полиномиальной функцией 5-го порядка, красными маркерами обозначены измеренные значения расходов, к которым осуществлялась подгонка.

Дополнительно ИНС был задан контрольный ряд значений расстояния по руслу реки, включающий значения, кратные 1.4 км, и модулирующий расстояние от устья: 0; 1.4; 2.8; 4.2; 5.6; 7 км и т.д., всего 100 точек, по которым нейросеть вычислила точные значения межених расходов (рис. 5). Полученный график является нейросетевой интерполяцией расходов воды по всему руслу и может быть использован для расчета кратностей разбавления загрязняющих веществ при характеристике различных участков бассейна, расчетах нормативно-допустимых сбросов.

Заключение

Проведенный эксперимент продемонстрировал высокую эффективность нейросетевых моделей, в частности, многослойного персептрона, при решении задач интерполяции. Полученная модель оказалась точнее линейных и полиномиальных аппроксиматоров, традиционно использующихся для решения подобных задач. Достоинством подхода явля-

ется также возможность дообучения ИНС при получении обновленных данных, а также простота интегрирования в другие алгоритмы для использования в составе более сложных систем. Эффективность апробированного алгоритма позволяет обоснованно использовать аппроксиматоры на основе ИНС при решении задач интерполяции, нахождения пропущенных значений, прогнозирования тенденций.

Список литературы

1. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. М.: Конкорд, 1992. 519 с.
2. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. 1104 с.
4. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 176 с.

References

1. Butch G. Ob"ektno-orientirovannoe proektirovanie s primerami primeneniya [Object-oriented design with examples of application]. Moscow: Concord, 1992. 519 p.
2. Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskustvennye nejronnye seti. Teoriya i praktika [Artificial neural networks. Theory and

practice]. Moscow: Hotline-Telecom, 2002. 382 p.

3. Khaikin S. Neironnye seti: polnyj kurs [Neural networks: a complete course]. Moscow: Williams, 2006. 1104 p.

4. Yasnitsky L.N. Vvedenie v iskustvennyj intellekt [Introduction to artificial intelligence]. Moscow: Publishing Center «Academy», 2008. 176 p.

Valiev V.S., Ivanov D.V., Gorshkova A.T., Urbanova O.N., Mustakimova I.V. **Using artificial neural networks to solve problems of channel flow interpolation (on the example of the Kazanka river).**

The possibilities of using an artificial neural network based on the multilayer perceptron paradigm for interpolating the values of channel water discharges along the length of the Kazanka River are analyzed. The experiment demonstrated the high efficiency of the obtained neural network model, which turned out to be more accurate than linear and polynomial approximators traditionally used to solve such problems. The resulting model can be used in assessing the normatively permissible discharges in any part of the river.

Keywords: river flow; modeling; water costs, neural networks; Kazanka river.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 15.03.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 30.03.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.04.2023

Информация об авторах

Валиев Всеволод Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: podrost@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Горшкова Асия Тихоновна, кандидат географических наук, зав. лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: agorshkova@gmail.com.

Урбанова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: urbanovoi@mail.ru.

Мустакимова Ирина Викторовна, соискатель, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: agorshkova@gmail.com.

Information about the authors

Vsevolod S. Valiev, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: podrost@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: water-rf@mail.ru.

Asiya T. Gorschkova, Ph.D. in Geography, Head of laboratory, Researcher Institute for Problem of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: agorshkova@gmail.com.

Olga N. Urbanova, Senior Researcher, Research Institute for Problem of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: urbanovoi@mail.ru.

Irina V. Mustakimova, Applicant, Researcher Institute for Problem of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: agorshkova@gmail.com.



В.И. Кулагина, Л.М. Сунгатуллина, С.С. Рязанов, Р.Р. Шагидуллин,
А.Б. Александрова, Э.Х. Рупова

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, viksoil@mail.ru

МИКРОБНАЯ БИОМАССА И ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПОЧВ РАИФСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

В статье приведены результаты определения запасов микробного углерода, показателей активности каталазы и инвертазы в почвах разновозрастных лесов Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Содержание микробного углерода в верхних горизонтах почв колеблется от 0.44 до 1.24 мгС/г, а в слое 0–30 см его запасы варьируют от 1.33 до 2.69 тС/га. Относительное содержание микробного углерода от общего органического углерода почвы с глубиной увеличивается. В гумусовых горизонтах она составляет 2.5–4.4%, в иллювиальных достигает 14–70%. Минимальные значения содержания углерода микробной биомассы, инвертазной и каталазной активности наблюдаются в почвах под сосняками, в почвах под лиственными лесами эти показатели выше. Показана корреляционная связь между количеством микробной биомассы в почвах и активностью инвертазы ($r=0.87$), активностью каталазы и гумуса (0.73), активностью каталазы и инвертазы (0.79). Средняя корреляционная зависимость отмечена между содержанием микробного углерода и гумуса в верхних горизонтах почв ($r=0.53$), активностью инвертазы и содержанием гумуса (0.48), активностью каталазы и содержанием микробного углерода (0.60).

Ключевые слова: почва; микробная биомасса; инвертаза; каталаза; запасы микробного углерода.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.49.56>

Введение

Микробная биомасса почв и почвенные ферменты играют важную роль в круговороте веществ в лесных экосистемах, отвечают за разложение поступающих в почву органических остатков, образование гумуса и поступление парниковых газов из почв в атмосферу (Lin et al., 1999; Стольникова и др., 2011; Хазиев, 2018). В связи с усилением интереса к оценке роли лесов в процессах секвестрации и эмиссии углерода, определение запасов микробной биомассы и показателей активности ферментов в почвах лесных экосистем приобретают особую значимость.

Цель работы – определить запасы микробного углерода, соотношение микробной биомассы и органического углерода, а также их взаимосвязь с ферментативной активностью почв лесных биогеоценозов Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

Материалы и методы исследования

Материалом для исследований послужили пробы почв, отобранные в мае–июне 2022 г. на шести учетных площадках Раифского участка

ВКГПБЗ. Участок расположен в Зеленодольском районе Республики Татарстан, занимает площадь 5921.2 га. В структуре почвенного покрова преобладают песчаные и легкосуглинистые разновидности дерново-подзолистых почв. По данным лесотаксации, на территории Раифского участка заповедника преобладают сосняки (3552.0 га), липняки (1003.6 га) и березняки (885.5 га). Меньшие площади занимают ельники, тополевики, ольшанники, кленовики, тальники, осинники. Раифский лес – старовозрастный. Молодняки занимают до 1.5% от общей его площади.

Пробные площадки были заложены с учетом преобладающих пород и возрастных групп деревьев (табл. 1). На каждой из площадок выполнен отбор проб почв из гумусовых горизонтов методом конверта. В центре площадки закладывали почвенный разрез, из которого образцы отбирали по генетическим горизонтам.

Углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) в почвах определяли регидратационным способом по Т.П. Мирчинку и Н.С. Паникову, активность каталазы – методом Джонсона и Темпле, активность инвертазы – по Т.А. Щербакову, гумус – по И.В. Тю-

Таблица 1. Характеристика биогеоценозов пробных площадок
Table 1. Characteristics of biogeocenoses of test sites

Пробная площадка Trial site	Квартал Quarter	Тип биогеоценоза Type of biogeocenosis	Группа возраста Age group	Почва Soil
1	25	Сосняки	Перестойные	Дерново-подзолистая псевдофибровая песчаная
2	81	Липняки	Перестойные	Дерново-подзолистая легкосуглинистая
3	150	Березняки	Перестойные	Дерново-подзолистая контактно-глубокоглеевая легкосуглинистая
4	174	Сосняки	Средневозрастные	Дерново-подзолистая слабодифференцированная песчаная
5	151	Липняки	Средневозрастные	Дерново-подзолистая легкосуглинистая
6	151	Березняки	Средневозрастные	Дерново-подзолистая легкосуглинистая

рину. Степень обогащенности почв ферментами оценивали по шкалам Д.Г. Звягинцева (1978).

Лабораторные исследования гумусовых горизонтов проводили в пяти повторностях, минеральных – в двух.

Запас углерода микробной биомассы рассчитывали для верхнего 30-см слоя почвы, лесная подстилка в расчеты не включалась.

Показатели вариации исследуемых почвенных свойств рассчитывали только для гумусовых горизонтов. Для оценки различий между выборками использовали дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим апостериорным сравнением групповых средних при помощи критерия Тьюки ($\alpha=0.05$). Для учета взаимосвязей между показателями использован корреляционный анализ по Спирмену ($\alpha=0.05$).

Результаты и их обсуждение

Содержание микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) в гумусовых горизонтах почв Райфского участка заповедника изменялось от 0.44 до 1.24 мгС/г (табл. 2), эти значения в целом можно обозначить как характерные для дерново-подзолистых почв лесных биоценозов (Стольников и др., 2011; Курганова и др., 2022; Паринкина и др., 1995). Коэффициент вариации показателя на пробных площадках изменялся от 21.3% до 90.7%.

Микробная биомасса лесных почв тесно связана с их породным составом (Дубровина и др., 2021; Мостовая и др., 2015). В перестойных лесах ВКГПБЗ средняя микробная биомасса гумусовых горизонтов возрастала в ряду: сосняки – липняки – березняки (табл. 2). Относительное накопление

$C_{\text{мик}}$ в почвах под березняками может быть связано с их избыточной увлажненностью, признаком которой является глееватость нижних горизонтов. Статистически значимые различия отмечены между микробной биомассой почв под березняками и сосняками и ($p=0.002$), березняками и липняками ($p=0.038$).

В гумусовых горизонтах почв средневозрастных лесов хорошо заметна тенденция к увеличению $C_{\text{мик}}$ в ряду сосняки – березняки – липняки (табл. 2), однако наблюдаемые различия статистически не значимы.

В почвах под перестойными березняками $C_{\text{мик}}$ оказался в 2.5 раза выше, чем под средневозрастными ($p<0.01$). Для двух других типов леса $C_{\text{мик}}$ в почвах разновозрастных лесов находится примерно на одном уровне. Ранее для еловых, липово-дубовых и смешанных лесов было показано, что после достижения ими среднего возраста микробная биомасса почв, наоборот, снижается (Дубровина и др., 2021; Мостовая и др., 2015; Курганова и др., 2022).

Вполне ожидаемым результатом оказалось наличие тесной взаимосвязи между микробной биомассой и содержанием органического углерода в гумусовых горизонтах почв ($r=0.53$). Причем в пределах одного почвенного профиля взаимосвязь между указанными свойствами была еще более выражена: коэффициент корреляции для исследованных разрезов колебался от 0.89 до 0.98.

Вниз по профилю содержание гумуса и микробной биомассы почв закономерно снижается (табл. 2). На этом фоне доля углерода микробной биомассы в общем пуле органического углерода

Таблица 2. Углерод микробной биомассы и его доля в общем органическом углероде почв
Table 2. Carbon of microbial biomass and its share in the total organic carbon of soils

Горизонт, глубина, см Horizon, depth, cm	Общий углерод, мг/г Total carbon, mg/g	Микробный углерод Microbial carbon			
		Мин. – макс., мгC/г Min – max, mgC/g	Среднее содержание, мгC/г Average content, mgC/g	Доля от общего, % Share of the total, %	Запас в слое 30 см, тC/га Stock in 30 cm layer, tC/ha
Пробная площадка 1. Сосняк перестойный Trial site 1. Overmature pine forest					
A1 3–12	12.80	0.40–0.72	0.56	4.4	1.33
A2B 12–20	4.20	0.38–0.43	0.41	9.8	
B1 20–49	2.60	0.18–0.23	0.21	7.9	
B2 49–105	0.40	0.24–0.32	0.28	69.6	
Пробная площадка 2. Липняк перестойный Trial site 2. Overmature lime tree					
A1 2–18	25.00	0.53–1.29	0.77	3.1	1.39
A2 18–38	3.88	0.07–0.30	0.19	4.8	
A2B 38–46	1.68	0.14–0.18	0.16	9.6	
B1 46–75	2.09	0.16–0.18	0.17	7.9	
B2 75–100	2.03	0.32–0.36	0.34	16.8	
Пробная площадка 3. Березняк перестойный Trial site 3. Overmature birch forest					
A1 4–19	20.53	0.79–1.64	1.24	6.0	2.62
A2 19–47	2.03	0.49–0.58	0.54	26.6	
Пробная площадка 4. Сосняк средневозрастный Trial site 4. Middle-aged pine forest					
A1 5–14	11.4	0.19–1.01	0.44	3.9	1.39
A2 14–23	0.87	0.34–0.38	0.36	41.4	
B 23–65	1.16	0.27–0.40	0.34	29.3	
Пробная площадка 5. Липняк средневозрастный Trial site 5. Middle-aged lime tree					
A1 3–18	30.97	0.27–1.43	0.78	2.5	2.25
A2 18–40	2.67	0.47–0.48	0.48	17.9	
B 40–80	1.22	0.26–0.32	0.29	24.0	
Пробная площадка 6. Березняк средневозрастный Trial site 6. Middle-aged birch forest					
A1 3–18	12.29	0.34–0.68	0.54	4.4	1.34
A2 18–45	3.48	0.21–0.26	0.24	6.9	
B 45–83	1.74	0.24–0.25	0.24	13.8	

почв возрастает от нескольких процентов в гумусовых горизонтах до 14–70% в иллювиальных. Такой характер распределения микробного углерода согласуется с результатами Е.В. Стольниковой (Стольникова и др., 2011) и О.А. Фомичевой (Фомичева и др., 2006) и, по-видимому, связан с увеличением доли лабильных органических веществ, наиболее пригодных для питания микроорганизмов, в иллювиальных горизонтах дерново-подзолистых почв.

В абсолютном выражении запасы $C_{\text{мик}}$ в дерново-подзолистых почвах Раифского участка ВКГПБЗ (табл. 2) незначительны. При этом они в 1.5–5 раз выше, чем в дерново-подзолистых почвах лесов Карелии (Дубровина и др., 2021), что, по-видимому, связано с климатическими особенностями сравниваемых территорий.

Оценивая показатели активности ферментов,

следует отметить, что активность инвертазы в гумусовых горизонтах исследуемых почв проявляется более сильную корреляционную зависимость с содержанием микробного углерода ($r=0.87$), чем гумуса ($r=0.48$). Это свидетельствует о её преимущественно микробном, а не растительном происхождении (Гродницкая и др., 2016).

В пределах почвенного профиля взаимосвязь между содержанием гумуса и активностью инвертазы выражена сильнее ($r=0.98–0.99$), что в целом согласуется с литературными данными (Гродницкая и др., 2016; Мищенко и др., 2021; Казеев и др., 2012).

Инвертаза является катализатором процессов гидролиза поли- и дисахаридов и принимает активное участие в разложении лабильного гумуса (Казеев и др., 2012). В почвах Раифского участка активность инвертазы под сосняками ниже,

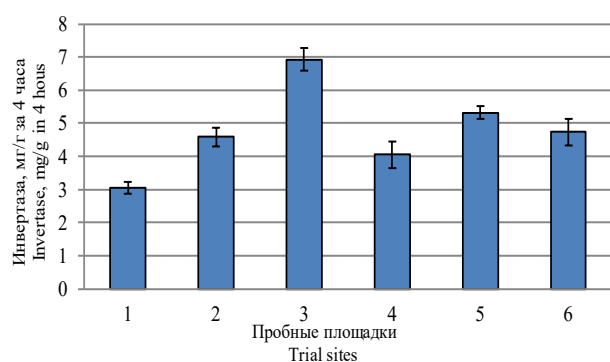


Рис. 1. Активность инвертазы в гумусовых горизонтах почв ($M \pm m$):
1 – сосняк перестойный, 2 – липняк перестойный, 3 – березняк перестойный, 4 – сосняк средневозрастный, 5 – липняк средневозрастный, 6 – березняк средневозрастный
Fig. 1. Invertase enzyme activity in the humus horizons ($M \pm m$):
1 – overmature pine forest, 2 – overmature lime forest, 3 – overmature birch forest, 4 – middle-aged pine forest, 5 – middle-aged linden forest, 6 – middle-aged birch forest

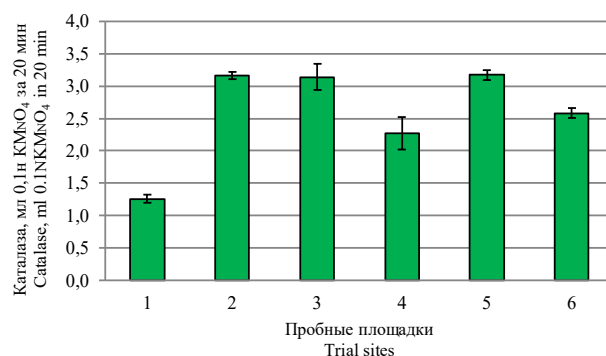


Рис. 2. Активность каталазы в гумусовых горизонтах почв ($M \pm m$):
1 – сосняк перестойный, 2 – липняк перестойный, 3 – березняк перестойный, 4 – сосняк средневозрастный, 5 – липняк средневозрастный, 6 – березняк средневозрастный
Fig. 2. Catalase activity in the humus horizons of the soils ($M \pm m$):
1 – overmature pine forest, 2 – overmature lime forest, 3 – overmature birch forest, 4 – middle-aged pine forest, 5 – middle-aged linden forest, 6 – middle-aged birch forest

чем под лиственными лесами (рис. 1). Согласно оценочным шкалам Д.Г. Звягинцева (1978), активность инвертазы на всех пробных площадках относилась к категории «средняя».

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа с последующим попарным сравнением

значений показали, что, в отличие от средневозрастных лесов, в почвах перестойных лесов различия в активности инвертазы были статистически значимы (табл. 3). Между лесами одного породного состава, но разного возраста, статистически значимая разница в активности инвертазы

Таблица 3. Результаты попарного сравнения значений согласно критерию Тьюки по активности инвертазы в почвах пробных площадок (p -значение)

Table 3. Results of pairwise comparison of the values according to the Tukey test for the activity of invertase in the soils of the test plots (p -value)

Пробные площадки Trial sites	Сосняк перестойный Overmature pine forest	Липняк перестойный Overmature lime forest	Березняк перестойный Overmature birch forest	Сосняк средневозрастный Middle-aged pine forest	Липняк средневозрастный Middle-aged linden forest	Березняк средневозрастный Middle-aged birch forest
Сосняк перестойный Overmature pine forest	—	0.035*	< 0.001*	0.472	< 0.001*	0.016*
Липняк перестойный Overmature lime forest	0.035*	—	< 0.001*	0.881	0.524	0.999
Березняк перестойный Overmature birch forest	< 0.001*	< 0.001*	—	< 0.001*	0.006*	< 0.001*
Сосняк средневозрастный Middle-aged pine forest	0.472	0.881	< 0.001*	—	0.121	0.731
Липняк средневозрастный Middle-aged linden forest	< 0.001*	0.524	0.006*	0.121	—	0.739
Березняк средневозрастный Middle-aged birch forest	0.016*	0.999	< 0.001*	0.731	0.739	—

* статистически значимая разница
* statistically significant difference

Таблица 4. Результаты попарного сравнения значений согласно критерию Тьюки по активности каталазы в почвах пробных площадок (*p*-значение)

Table 4. Results of pairwise comparison of the values according to the Tukey test for the catalase activity in the soils of the test plots (*p*-value)

Пробные площадки Trial sites	Сосняк перестойный Overmature pine forest	Липняк перестойный Overmature lime forest	Березняк перестойный Overmature birch forest	Сосняк сред- невозрастный Middle-aged pine forest	Липняк сред- невозрастный Middle-aged linden forest	Березняк сред- невозрастный Middle-aged birch forest
Сосняк перестойный Overmature pine forest	-	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*
Липняк перестойный Overmature lime forest	< 0.001*	-	0.999	< 0.001*	0.999	0.024*
Березняк перестойный Overmature birch forest	< 0.001*	0.999	-	< 0.001*	0.999	0.057
Сосняк средневозрастный Middle-aged pine forest	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	-	< 0.001*	0.704
Липняк средневозрастный Middle-aged linden forest	< 0.001*	0.999	0.999	< 0.001*	-	0.038*
Березняк средневозрастный Middle-aged birch forest	< 0.001*	0.024*	0.057	0.704	0.038*	-

* статистически значимая разница

* statistically significant difference

наблюдалась только у березняков.

Каталаза участвует в расщеплении перекиси водорода, появляющейся в почвах в результате процесса дыхания (Казеев и др., 2012). Ее активность в гумусовых горизонтах почв лесных биоценозов Раифы тесно связана с активностью инвертазы ($r=0.79$), а также показателями содержания общего ($r=0.73$) и микробного углерода ($r=0.60$), что согласуется с литературными данными (Завалишин и др., 2018; Мищенко и др., 2021; Магда и др., 2022).

В почвах лиственных лесов активность каталазы оказалась установлена на уровне, примерно в 2 раза выше, чем в почвах сосновых лесов (рис. 2). Для перестойных лесов наименьшие показатели активности характерны для почв сосняков, их различия с березовыми и липовыми лесами были статистически значимы (табл. 4). Последние по активности каталазы не имели друг с другом статистически значимых различий. В ряде исследований (Перминова и др., 2018; Cheng et al., 2013) также была отмечена более высокая активность

каталазы в минеральных горизонтах почв лиственных лесов по сравнению с хвойными.

В почвах, развивающихся под средневозрастными лесами, максимальная активность каталазы отмечается под липняками (рис. 2); отличия с показателями каталазной активности почв средневозрастных березовых и сосновых лесов были статистически значимы (табл. 4). Что касается активности каталазы в почвах лесов различных возрастных групп, но одного породного состава, то различия между ними были обнаружены только для почв сосняков.

Заключение

Содержание углерода микробной биомассы в гумусовых горизонтах дерново-подзолистых почв Раифского участка Волжско-Камского заповедника колеблется от 0.44 до 1.24 мгС/г. Его запасы в слое 0–30 см варьируют от 1.33 до 2.62 тС/га, что для данного типа почв можно оценивать как значительные.

Доля микробного углерода в гумусовых гори-

зонтах почв изменяется в пределах от 2.5 до 4.4%; в иллювиальных горизонтах она возрастает до 13.8–69.6%, что может быть связано с накоплением в средней части профиля лабильного гумуса, хорошо поддающегося микробному разложению.

Активность инвертазы, каталазы и содержание углерода микробной биомассы в почвах под сосняками ниже, чем под березняками и липняками, что может быть связано, как с породным составом леса, так и с более легким гранулометрическим составом почв под сосняками.

Активность инвертазы проявляет более тесную корреляционную зависимость с микробной биомассой почв, чем с содержанием в них гумуса ($r=0.87$ и 0.48 , соответственно), что указывает на ее преимущественно микробное происхождение. Активность каталазы, наоборот, коррелирует с содержанием гумуса, чем с углеродом микробной биомассы (коэффициент корреляции соответственно 0.73 и 0.60). Средняя, а не высокая, корреляционная зависимость с углеродом микробной биомассы, вероятно, связана с тем, что источником значительной доли каталазы в почве являются выделения корней растений.

Список литературы

1. Завалишин С.И., Карелина В.С. Зависимость активности почвенных ферментов от физико-химических свойств дерново-подзолистых почв трансформированных лесных угодий // Вестник Алтайского государственного аграрного ун-та. 2018. №6. С. 47–52.
2. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. №6. С. 48–54.
3. Гродницкая И.Д., Кузнецова Г.В., Антонов Г.И., Кондакова О.Э. Влияние географических культур кедр сибирского и кедр корейского на биологические свойства почвы юга Красноярского края // Лесоведение. 2016. №2. С. 135–147.
4. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Туюнен А.В., Карпечко А.Ю., Геникова Н.В., Медведева М.В., Мамай А.В., Толстогузов О.В., Кулакова Л.М. Влияние типа землепользования на свойства почв и структуру экосистемных запасов углерода в среднетаежной подзоне Карелии // Почвоведение. 2021. №11. С. 1392–1406. doi: 10.31857/S0032180X21110058.
5. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. 260 с.
6. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5, № 2. С. 1–16. doi: 10.31251/pos.v5i2.169.
7. Магда Е.В., Мазиров М.А., Зинченко М.К. Активность каталазы и инвертазы при различной интенсивности механической обработки почвы // Владимирский земледелец. 2022. №2. С. 24–30. doi:10.24412/2225-2584-2022-2-24-30
8. Мищенко Н.В., Курочкин И.Н., Чугай Н.В., Кулагина Е.Ю. Оценка состояния почв необрабатываемых сельскохозяйственных угодий по показателям ферментативной актив-

ности, гумуса и тяжелых металлов // Вестник НВГУ. 2021. №2. С. 106–111. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/21-2/14>.

9. Мостовая А.С., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хохлова О.С., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Изменение микробиологической активности серых лесных почв в процессе естественного лесовосстановления // Вестник ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация. 2015. №2. С. 64–72.

10. Паринкина О.М., Ключева Н.В. Микробиологические аспекты уменьшения естественного плодородия почв при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1995. №5. С. 573–581.

11. Перминова Е.М., Лаптева Е.М. Каталазная активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных лиственно-хвойных сообществ // Аграрный вестник Урала. 2018. №5. С. 44–53.

12. Полянская Л.М., Суханова Н.И., Чакмазян К.В., Звягинцев Д.Г. Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи // Почвоведение. 2012. №7. С. 792–798.

13. Стольникова Е.В., Ананьева Н.Д., Чернова О.В. Микробная биомасса, ее активность и структура в почвах старовозрастных лесов европейской территории России // Почвоведение. 2011. №4. С. 479–494.

14. Фомичева О.А., Полянская Л.М., Никонов В.В., Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Звягинцев Д.Г. Численность и биомасса почвенных микроорганизмов в коренных старовозрастных среднетаежных еловых лесах // Почвоведение. 2006. №12. С. 1469–1478.

15. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1, №2. С. 80–92. doi: 10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92.

16. Lin Q., Brookes P.C. Comparison of substrate induced respiration, selective inhibition and biovolume measurements of microbial biomass and its community structure in unamended, ryegrass-amended, fumigated and pesticide-treated soils // Soil biology and biochemistry. 1999. Vol. 31, No 14. P. 1999–2014.

17. Cheng F., Peng X., Zhao P., Yuan J., Zhong C., Cheng Y., Cui C., Zhang Sh. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling mountains // PLoS ONE. 2013. №8(6). e67353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353>.

References

1. Zavalishin S.I., Karelina V.S. Zavisimost' aktivnosti pochvennykh fermentov ot fiziko-khimicheskikh svoystv der-novo-podzolistykh pochv transformirovannykh lesnykh ugodiy [Dependence of soil enzymes activity on physical and chemical properties of soddy-podzolic soils of transformed forest lands] // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]. 2018. No 6. P. 47–52.
2. Zvyaginцев D.G. Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya ocenki nekotorykh ee pokazatelej [Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators] // Pochvovedenie [Soil science]. 1978. No 6. P. 48–54.
3. Grodnitskaya I.D., Kuznetsova G.V., Antonov G.I., Kondakova O.E. Vliyaniye geograficheskikh kul'tur kedra sibirskogo i kedra koreyskogo na biologicheskiye svoystva pochvy yuga Krasnoyarskogo kraia [The effect of provenance trial plantations of Siberian pine and Korean pine on biological properties of soils in the south of the Krasnoyarsk Krai] // Lesovedeniye [Forestry]. 2016. No 2. P. 135–147.
4. Dubrovina I.A., Sidorova V.A., Moshkina E.V., Tuyunen A.V., Karpechko A.Y., Genikova N.V., Medvedeva M.V., Mamai A.V., Tolstoguzov O.V., Kulakova L.M. Vliyaniye tipa zemlepol'zovaniya na svoystva pochv i strukturu ekosistemnykh za-

pasov ugleroda v srednetayezhnoy podzone Karelii [The impact of land use on soil properties and the structure of ecosystem carbon stocks in the middle taiga subzone of Karelia] // *Pochvovedeniye* [Soil science]. 2021. Vol. 54. No 11. P. 1756–1769. doi: 10.1134/S1064229321110053.

5. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Biodiagnostika pochv: metodologiya i metody issledovaniy [Soil biondiagnostics: methodology and research methods]. Rostov-na-Donu: Yuzhniy federal'niy universitet, 2012. 260 p.

6. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilotnyy karbonovyy poligon v Rossii: analiz zapasov ugleroda v pochvakh i rastitel'nosti [Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation] // *Pochvy i okruzhayushchaya sreda* [The Journal of Soils and Environment]. 2022. No 2. P. 1–16. doi: 10.31251/pos.v5i2.169/

7. Magda E.V., Mazirov M.A., Zinchenko M.K. Aktivnost' katalazy i invertazy pri razlichnoy intensivnosti mekhanicheskoy obrabotki pochvy [Activity of catalase and invertase by different tillage intensity soil] // *Vladimirskiy zemledelets* [Vladimir agronomist]. 2022. No 2. P. 24–30. doi: 10.24412/2225-2584-2022-2-24-30.

8. Mischenko N.V., Kurochkin I.N., Chugay N.V., Kulagina E.Yu. Otsenka sostoyaniya pochv neobrabatyvayemykh sel'skokhozyaystvennykh ugodiy po pokazatelyam fermentativnoy aktivnosti, gumusa i tyazhelykh metallov [Assessment of the State of Soils of Uncultivated Agricultural Lands by Indicators of Enzymatic Activity, Humus, and Heavy Metals] // *Vestnik Nizhnevolzhskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Nizhnevolzhsk State University]. 2021. No 2. P. 106–111. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/21-2/14/>

9. Mostovaya A.S., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Khokhlova O.S., Rusakov A.V., Shapovalov A.S. Izmeneniye mikrobiologicheskoy aktivnosti serykh lesnykh pochv v protsesse yestestvennogo lesovosstanovleniya [Changes in the microbiological activity of gray forest soils during the natural reforestation] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy]. 2015. No 2. P. 64–72.

10. Parinkina O.M., Klyueva N.V. Mikrobiologicheskiye aspekty umen'sheniya yestestvennogo plodorodiya pochv pri ikh sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii [Microbiological aspects of reducing the natural fertility of soils during their agricultural use] // *Pochvovedeniye* [Soil science]. 1995. No 5. P. 573–581.

11. Perminova E.M., Lapteva E.M. Katalaznaya aktivnost' podzolistykh pochv korennoy yel'nika chernichnogo i raznovozrastnykh listvenno-khvoynykh soobshchestv [Catalase activity of podzolic soils of indigenous blueberry spruce forest and different age deciduous-coniferous communities] // *Agrarnyy vestnik Urals* [Agrarian bulletin of the Urals]. 2018. No 5. P. 44–53.

12. Polyanskaya L.M., Sukhanova N.I., Chakmazyan K.V., Zvyagintsev D.G. Osobennosti izmeneniya struktury mikrobnoy biomassy pochv v usloviyakh zalezhi [Peculiarities of changes in the structure of soil microbial biomass under fallow conditions] // *Pochvovedeniye* [Soil science]. 2012. No 7. P. 792–798.

13. Stolnikova E.V., Ananyeva N.D., Chernova O.V. Mikrobная biomassa, yeye aktivnost' i struktura v pochvakh starovozrastnykh lesov yevropeyskoy territorii Rossii [Microbial biomass, its activity and structure in soils of old-growth forests in European Russia] // *Pochvovedeniye* [Soil science]. 2011. No 4. P. 479–494.

14. Fomicheva O.A., Polyanskaya L.M., Nikonov V.V., Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Zvyagintsev D.G. Chislennost' i biomassa pochvennykh mikroorganizmov v korennykh starovozrastnykh srednetayezhnykh yelovykh lesakh [Number

and biomass of soil microorganisms in primary old-growth middle-taiga spruce forests] // *Pochvovedeniye* [Soil science]. 2006. No 12. P. 1469–1478.

15. Khaziev F.Kh. Ekologicheskiye svyazi fermentativnoy aktivnosti pochv [Ecological relations of the enzymatic activity of soils] // *Ekobiotekh* [Ecobiotech journal]. 2018. Vol. 1, No 2. P. 80–92. doi: 10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92

16. Lin Q., Brookes P.C. Comparison of substrate induced respiration, selective inhibition and biovolume measurements of microbial biomass and its community structure in unamended, ryegrass-amended, fumigated and pesticide-treated soils // *Soil biology and biochemistry*. 1999. Vol. 31, No 14. P. 1999–2014.

17. Cheng F., Peng X., Zhao P., Yuan J., Zhong C., Cheng Y., Cui C., Zhang Sh. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling mountains // *PLoS ONE*. 2013. No 8(6). e67353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353>.

Kulagina V.I., Sungatullina L.M., Ryazanov S.S., Shagidullin R.R., Alexandrova A.B., Rupova E.H. **Microbial biomass and enzymatic activity of forest soils in the Raifa area of the Volzhsko-Kamsky reserve.**

The article presents the results of determining the reserves of microbial carbon, the share of microbial carbon in the total soil carbon, the activity of catalase and invertase enzymes in forest soils of different ages and species composition. The objects of study were soddy-podzolic soils of six sample plots established in 2022 on the territory of the Raifa area of the Volzhsko-Kamsky state natural biosphere reserve. The soils under pine forests, birch forests, linden forests belonging to two age groups were studied: “middle-aged” and “overmature”. It has been established that the average content of microbial carbon in the humic soil horizons ranges from 0.44 to 1.24 mgC/g, decreasing with depth. The share of microbial carbon in the total soil organic carbon, on the contrary, increases with depth. In the humus horizons, it was 2.5–4.4%; in the illuvial horizons it reaches 14–70%. The reserves of microbial carbon in the 0–30 cm layer range from 1.33 to 2.69 tC/ha. The lowest values of carbon content of microbial biomass, invertase and catalase activity were observed in soils under pine forests. In soils under deciduous forests, these figures are higher. A high correlation was shown between the amount of microbial biomass in soils and invertase enzyme activity (r 0.87), catalase activity and humus content (0.73), catalase and invertase activity (0.79). An average correlation was noted between the content of microbial carbon and humus in the upper soil horizons (r 0.53), invertase activity and humus content (0.48), catalase activity and microbial carbon content (0.60).

Keywords: the soil; microbial biomass; invertase; catalase; microbial carbon reserves.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 05.04.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 26.04.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 31.04.2023

Информация об авторах

Кулагина Валентина Ивановна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: viksoil@mail.ru.

Сунгатуллина Люция Мансуровна, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: sunlyc@yandex.ru.

Рязанов Станислав Сергеевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: RStanislav.soil@yandex.ru.

Шагидуллин Рифгат Роальдович, член-корреспондент АН РТ, доктор химических наук, директор, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: shagidullin_@mail.ru.

Александрова Асель Биляловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: adabl@mail.ru.

Рупова Эльмира Ханисовна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: elmira.rupova@mail.ru.

Information about the authors

Valentina I. Kulagina, Ph.D. in Biology, Leading Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: viksoil@mail.ru.

Lutsia M. Sungatullina, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: sunlyc@yandex.ru.

Stanislav S. Ryzanov, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: RStanislav.soil@yandex.ru.

Rifgat R. Shagidullin, D.Sci. in Chemistry, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: shagidullin_@mail.ru.

Asel B. Alexandrova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: adabl@mail.ru.

Elmira H. Rupova, Ph.D. in Agriculture, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: elmira.rupova@mail.ru.



А.Б. Александрова, В.И. Кулагина, Д.В. Иванов, В.В. Маланин, А.А. Марасов

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, adabl@mail.ru

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛКАХ РАИФСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Приведены численные характеристики запасов углерода в подстилках разновозрастных лесных фитоценозов Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Запасы углерода в подстилках различных типов леса отличаются вариабельностью и в среднем равны: березняки 4.1 тС/га, липняки 4.8 тС/га, сосняки 12.9 тС/га.

Ключевые слова: запасы углерода; секвестрация углерода; лесная подстилка; Волжско-Камский биосферный заповедник.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.57.62>

Введение

Изучение запасов углерода в компонентах лесных биогеоценозов вызывает интерес в связи с глобальными и национальными проектами по ограничению эмиссии парниковых газов и декарбонизации ключевых отраслей экономики (Распоряжение ..., 2021). Минприроды РФ установлены справочные значения запасов углерода в лесных подстилках и почвах, формирующихся в условиях разновозрастных типов лесов разных климатических зон и физико-географических территорий (Распоряжение ..., 2017). Имеются обобщенные данные по запасам углерода подстилок для регионов и макрорегионов РФ (Честных и др., 2007, 2018, Иванов и др., 2018; Осипов, 2017). Следует отметить, что эти показатели характеризуют общую картину по регионам РФ, тогда как планирование мероприятий для устойчивого управления лесами, сохранению их биологического разнообразия и экосистемных функций необходимо проводить с учетом объективной и точной информации для элементарных лесохозяйственных единиц.

Наиболее информативными данными в системе наблюдений за формированием запасов углерода в компонентах лесных биогеоценозов являются численные характеристики, полученные по результатам исследования на эталонных участках, находящихся в условиях минимальной антропогенной нагрузки, в первую очередь, на особо охраняемых природных территориях.

Подстилка является основным источником пополнения элементов питания в почвах лесных фитоценозов, а также резервуаром органического вещества, вносящим вклад в общий пул углерода лесных экосистем (Замолодчиков, 2011). Содер-

жание углерода в подстилках различных типов леса варьирует от 41 до 53% (Замолодчиков, 2011; Осипов, 2017; Пристова, 2020).

Цель работы – оценить запасы углерода в подстилках разновозрастных лесов преобладающих древесных пород Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

Материалы и методы исследования

Раифский участок ВКГПБЗ представляет собой лесной биогеоценоз, расположенный на южной границе зоны лесов умеренного пояса среднего Поволжья. Геоморфологические особенности участка определяются строением палеодолины р. Волги, осложненной тектоническими и карстовыми нарушениями эрозионного рельефа и перекрытой толщей четвертичных отложений, обуславливающих террасовый рельеф Раифского леса (Тайсин, 2008). Почвообразующие породы здесь представлены крупнозернистыми песками, темно-коричневыми глинами и суглинками с прослойками светло-серых кварцевых песков, дюнными песками (Калимуллина, 2002). В структуре почвенного покрова преобладают представители дерново-подзолистых почв (Калимуллина, 2002; Александрова и др., 2014).

Растительность Раифского участка ВКГПБЗ представлена хвойными и лиственными фитоценозами (Рогова и др., 2005). Преобладают сосняки лишайниковые, лишайниково-бруснично-мшистые, чернично-бруснично-мшистые, чернично-кислично-мшистые, бруснично-травяные. Лиственные формации представлены широколиственными породами, а также березой, осинкой и ольхой.

Исследования проводили в 2022 г. в шести биогеоценозах с учетом данных лесной таксации: 1 – сосняк перестойный; 2 – липняк перестойный; 3 – березняк перестойный; 4 – сосняк средневозрастный; 5 – липняк средневозрастный; 6 – березняк средневозрастный. Размеры пробных площадок варьировали от 0.05 до 0.36 га. В их границы входило 200 деревьев основной породы с полнотой древостоя 0.7.

Отбор проб лесной подстилки на пробных площадках проводился при помощи рамки 20×20 см в 24-кратной повторности в приствольной и межкрупной зонах. Всего отобрано 144 пробы. Образцы высушивали до абсолютно-сухого состояния, взвешивали. Расчет запаса углерода в пуле подстилки проводили с учетом среднего содержания углерода в подстилке путем умножения сухого веса на коэффициент 0.4 (Распоряжение ..., 2017).

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica 8.0. Для выявления различий выборок использовали критерий Манна-Уитни (M-W U-тест). Оценку численных характеристик проводили по среднему арифметическому значению.

Результаты и их обсуждение

Запасы углерода в лесных подстилках Раифского участка ВКГПБЗ варьировали в широких пределах: от 1.7 до 40.1 т/га (коэффициент вариации 78.5%) (рис. 1). Минимальные запасы характерны для лиственных биогеоценозов – около 4.0 т/га.

Запасы углерода в подстилке березняков различного возраста находились в диапазоне 1.7–9.6 тС/га, в целом характерном как для березовых насаждений Республики Татарстан (Пуряев, 2006; Ульданова, 2017), так и для и южно-таежных фитоценозов РФ (Подвезенная, 2011), и не имели между собой статистически значимых различий ($p < 0.05$).

Совершенно иная картина наблюдалась в липняках, где средние запасы углерода подстилки в липняках средневозрастных (4.4 ± 0.2 т/га) были достоверно ниже, чем в перестойных (5.6 ± 0.4 т/га) (рис. 1), что объясняется различной скоростью разложения компонентов опада. По данным Т.А. Пристовой (2020), листья липы разлагаются на 30–50% более интенсивно, чем ветки. Учитывая, что по прочности ствола и своей устойчивости к ветру липа уступает березе, в перестойных биогеоценозах с доминированием липы в струк-

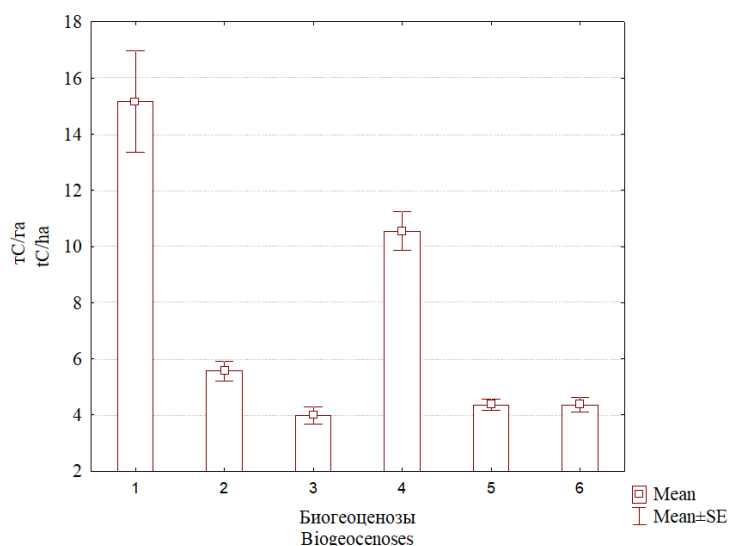


Рис. 1. Запасы углерода в лесных подстилках биогеоценозов Раифского участка ВКГПБЗ: 1 – сосняк перестойный; 2 – липняк перестойный; 3 – березняк перестойный; 4 – сосняк средневозрастный; 5 – липняк средневозрастный; 6 – березняк средневозрастный

Fig. 1. Carbon reserves in the forest litter of the biogeocenoses of the Raifa site of the VKGPBZ: 1 – overstory pine; 2 – overstory linden; 3 – overstory birch; 4 – medium-aged pine; 5 – medium-aged linden; 6 – medium-aged birch

туре подстилки накопление более грубых компонентов, таких как ветки, происходит довольно активно.

Средние запасы углерода подстилки в липняках средневозрастных (4.4 ± 0.2 т/га) и перестойных (5.6 ± 0.4 т/га) Раифского участка ВКГПБЗ существенно ниже, чем в липняках, произрастающих в условиях лесных хозяйств Республики Татарстан (9.5 т/га) (Пуряев, 2006). Одной из причин наблюдаемого явления, как мы предполагаем, является большая лабильность межгодовой структуры сообществ почвенных беспозвоночных, обитающих в подстилке и почве, что, в свою очередь, обуславливает различную интенсивность минерализации подстилки и влияет на скорость накопления углерода подстилки липовых биогеоценозов (Гордиенко и др., 2016).

Максимальные запасы углерода характерны для подстилок сосновых биогеоценозов. Диапазоны их варьирования в сосняке перестойном составили 5.7–40.1 (в среднем 15.2 ± 1.8) т/га, в сосняке средневозрастном – 5.4–23.0 (10.5 ± 0.7) т/га. Аналогичные данные были получены Р.А. Ульдановой (2017) для сосновых фитоценозов исследуемого региона – 12.7–15.3 тС/га. Хвоя, ветки и шишки хвойных пород разлагаются медленно, поэтому более 70% их опада накапливается в подстилке (Пристова, 2020).

Существенным образом уточняют и дополня-

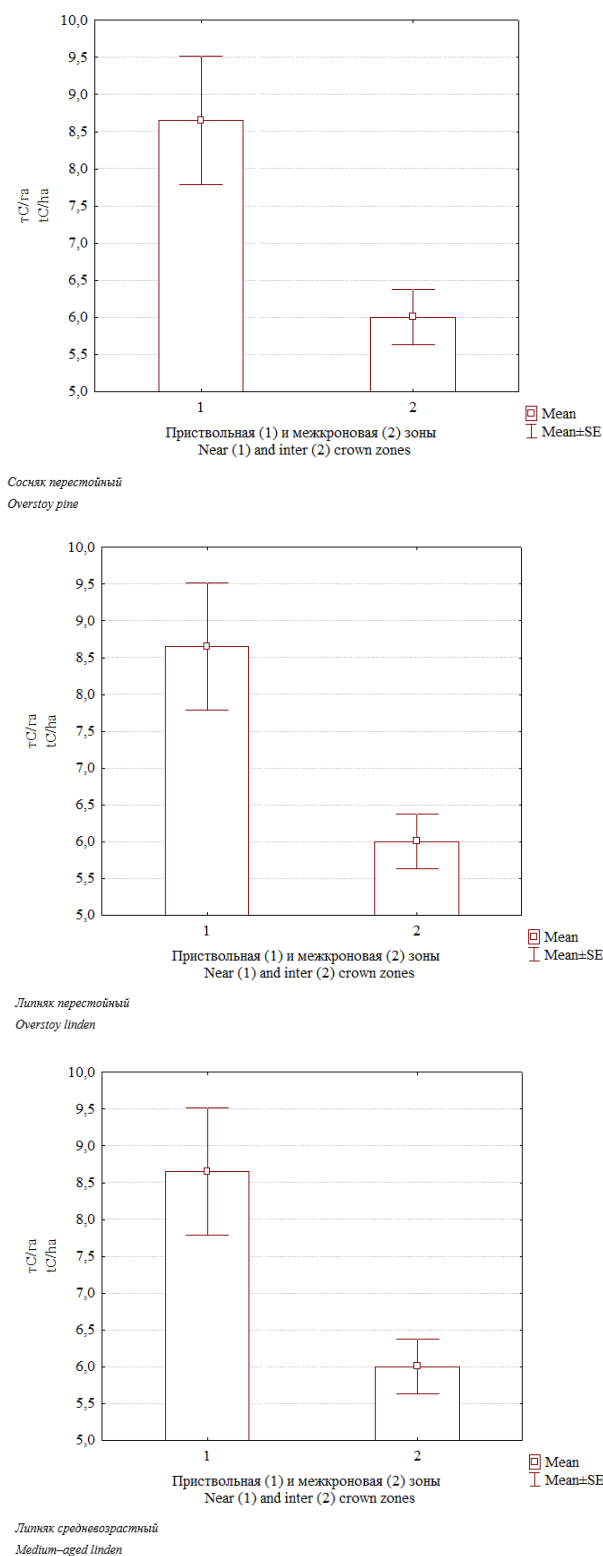


Рис. 2. Запасы углерода в лесной подстилке
приствольной и межкроновой зон
Fig. 2. Carbon reserves in the forest floor of the
near and inter-crown zones

ют картину запасов углерода данные об особенностях накопления распределения опада в приствольной и межкроновой зонах деревьев. Известно, что они могут различаться между собой до 3 раз (Матвеев и др., 2016; Уфимцев, 2016). В лесной подстилке Раифского участка ВКГПБЗ в приствольной зоне запасы углерода в среднем 1.3–2.3 раза выше, чем в межкроновой ($p < 0.05$) (рис. 2).

Наиболее значительны различия в запасах углерода подстилки в сосняках перестойных – 13.5 т/га. В старовозрастных фитоценозах деревья-эдификаторы, создающие мощное фитогенное поле, оказывают существенное влияние на распределение численности и биомассы почвенных микроорганизмов в подкروновых пространствах и «окнах» между кронами. Наиболее благоприятные для них условия питательного режима развиваются в органогенных горизонтах приствольных зон, почвы которых обогащены гумусом и необходимыми элементами питания. Кроме того, питательные вещества в приствольные зоны также могут поступать с кроновыми и стволовыми водами (Фомичева, 2008; Уфимцев, 2016; Матвеев, 2016). В хвойных лесах лимитирующим фактором, влияющим на накопление подстилки и замедляющими активность микроорганизмов под кронами деревьев, выступает высокое содержание фенолов в стволовых и кроновых водах (Уфимцев, 2016).

Большие запасы подстилки концентрируются под кронами, что связано с накоплением у подножия стволов сухих веток, которые, перегнивая, пополняют массу фитодетрита (Матвеев и др., 2016). В возрастных насаждениях в структуре опада доля отмерших ветвей еще более возрастает.

С методической точки зрения представлялось важным сравнение фактических данных о запасах углерода в лесной подстилке преобладающих пород Раифского участка ВКГПБЗ с усредненными данными, содержащимися в «Методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (Распоряжение ..., 2017) (табл.).

В зависимости от преобладающей древесной породы различия между сравниваемыми значениями достигали от 1.9 до 3.9 т/га. При этом максимальные расхождения между натурными и расчетными данными запасов углерода отмечались в сосновых фитоценозах. Расчеты показали, что в подстилке сосняков Раифского участка ВКГПБЗ сосредоточено в среднем на 30.2% больше углерода, чем в подстилках сосняков южно-таежной зоны Европейско-Уральского макрорегиона (Распоряжение ..., 2017). Напротив, запасы углерода подстилки в лиственных лесах Раифского участка заповедника оказались на 28.4–33.9% ниже, чем в таковых юж-

Таблица. Запасы углерода в подстилках лесов Раифского участка ВКГПБЗ по преобладающим породам
Table. Carbon reserves in the forest litter of the Raifa section of the Volga-Kama Nature Reserve by dominant tree species

Преобладающая порода Dominant tree species	Фактические запасы углерода в лесах Раифы, тС/га Actual carbon stocks in Raifa forests, tC/ha	Средние запасы углерода в лесах Европейско-Уральского макрорегиона РФ, тС/га* Average carbon stocks in the forests of the European-Ural macroregion of the Russian Federation, tC/ha*
Сосна	12.9	9.0
Липа	4.8	6.7
Береза	4.1	6.2

*Распоряжение ..., 2017

*Order ..., 2017

но-таежной зоны Европейско-Уральского макрорегиона.

Закключение

В лесных подстилках Раифского участка Волжско-Камского биосферного заповедника средние запасы углерода достигают 13.9 т/га в хвойных и 4.9 т/га в лиственных биогеоценозах.

Установлены статистически значимые различия запасов углерода подстилки в приствольной и межкрупной зонах деревьев сосновых и липовых лесов. Запасы углерода в подстилке перестойных хвойных фитоценозов в приствольной зоне в 2.3 раза выше чем в межкрупной, в лиственных фитоценозах в 1.4–1.7 раз.

При расчете запасов углерода подстилки конкретных лесных массивов целесообразно использовать данные натурных исследований.

Список литературы

1. Александрова А.Б., Иванов Д.В., Маланин В.В., Марасов А.А., Паймикина Э.Е. Дерново-подзолистые почвы Раифского участка Волжско-Камского заповедника // Сборник научных трудов Института проблем экологии и недропользования АН РТ. Казань: Отечество, 2014. С. 198–212.
2. Гордиенко Т.А., Суходольская Р.А., Вавилов Д.Н. Почвообитающие беспозвоночные мезофауны Волжско-Камского государственного заповедника // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. 2016. №2. С. 1–9.
3. Замолотчиков Д.Г. Системы оценки и прогноза запаса углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. №4. С. 15–22.
4. Иванов А.В., Браун М., Замолотчиков Д.Г., Лынов Д.В., Панфилова Е.В. Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений Южного приморья // Почвоведение. 2018. №10. С. 1226–1233. doi: 10.1134/S0032180X18100052.
5. Калимуллина С.Н. История изучения почвенного покрова Волжско-Камского заповедника // Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника. Казань, 2002. Вып. 5. С. 199–213.

6. Матвеев А.М., Матвеева Т.А. Формирование лесной подстилки в светлых хвойных ценозах Восточного Саяна // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №9. С. 127–129. doi: 10.18454/IRJ.2016.51.165.

7. Осипов А.Ф. Запасы и потоки органического углерода в экосистеме спелого сосняка черничного Средней тайги // Сибирский лесной журнал. 2017. №2. С. 70–80. doi: 10.15372/SJFS20170208.

8. Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Изменчивость содержания и запасов углерода в почвах лесных биогеоценозов Южной тайги // Лесоведение. 2011. №1. С. 52–60.

9. Пристова Т.А. Скорость разложения растительного опада в лиственных насаждениях послерубочного происхождения в условиях средней тайги Республики Коми // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. №3. С. 62–72. doi 10.21178/2079–6080.2020.3.62.

10. Пуряев А.С. Почвенно-экологические функции защитных лесных насаждений Предволжья Республики Татарстан: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2006. 21 с.

11. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 №20-р (ред. от 20.01.2021) «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов»

12. Распоряжение Правительства Российской Федерации о внесении проекта федерального закона «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 20.02.2021. № 1542п-П11.

13. Рогова Т.В., Мангутова Л.А., Любина О.Е., Фархутдинова С.С. Классификация растительного покрова Раифского участка Волжско-Камского заповедника на ландшафтно-экологической основе // Труды Волжско-Камского государственного природного заповедника. Казань, 2005. Вып. 6. С. 213–240.

14. Тайсин А.С. Раифский лес в составе бореальных лесов Евразии. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008. 252 с.

15. Ульданова Р.А. Продуктивность и почвенные условия произрастания лесов правобережья реки Волги Республики Татарстан: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Казань, 2017. 24 с.

16. Уфимцев В.И., Егорова И.Н. Роль растительного опада в формировании фитогенных полей сосны обыкновенной на техногенных элювиях Кузбасса // Успехи современного естествознания. 2016. №4. С. 116–120.

17. Фомичева О.А. Оценка численности и структуры биомассы микроорганизмов в Al-Fe гумусовых подзолах коренных лесов Кольского полуострова: Автореф. дисс. ...

канд. биол. наук. М., 2008. 24 с.

18. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г. Подстилки лесной зоны России. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2018621165, 02.08.2018.

19. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. №6. С. 114–121.

References

1. Alexandrova A.B., Ivanov D.V., Malanin V.V., Marasov A.A., Paimikina E.E. Dornovo-podzolistye pochvy Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Soil-podzolic soils of the Raifa section of the Volga-Kama Reserve] // Sbornik nauchnykh trudov Instituta problem ekologii i nedropol'zovaniya AN RT [Scientific papers of the Institute for the problems of ecology and mineral wealth use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan]. Kazan, 2014. P. 198–212.

2. Gordienko T.A., Sukhodolskaya R.A., Vavilov D.N. Pochvoobitayushchie bespozvonochnye mezofauny Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo zapovednika [Soil-dwelling invertebrate mesofauna of the Volga-Kama State Reserve] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [Bulletin of the Orenburg state pedagogical university]. 2016. No 2. P. 1–9.

3. Zamolodchikov D. G. Sistemy ocenki i prognoza zapasa ugleroda v lesnykh ekosistemakh [Systems of assessment and forecast of carbon stock in forest ecosystems] // Ustoichivoe lesopol'zovanie [Sustainable forest management]. 2011. No 4. P. 15–22.

4. Ivanov A.V., Brown M., Zamolodchikov D.G., Lynov D.V., Panfilova E.V. Lesnye podstilki kak zveno cikla ugleroda hvoynno-shirokolistvennykh nasazhdenij Yuzhnogo primor'ya [Forest litter as a link in the carbon cycle of coniferous-deciduous plantations of Southern Primorye] // Pochvovedenie [Soil science]. 2018. No 10. P. 1226–1233. doi: 10.1134/S0032180X18100052.

5. Kalimullina S.N. Istoriya izucheniya pochvennogo pokrova Volzhsko-Kamskogo zapovednika // [History of the study of the soil cover of the Volga-Kama Reserve] // Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika [Proceedings of Volga-Kama reserve]. Kazan, 2002. Vol. 5. P. 199–213.

6. Matveev A.M., Matveeva T.A. Formirovanie lesnoj podstilki v svetlohojnykh cenzozakh Vostochnogo Sayana [Formation of forest litter in light coniferous cenoses of the Eastern Sayan] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International research journal]. 2016. No 9. P. 127–129. doi: 10.18454/IRJ.2016.51.165.

7. Osipov A.F. Zapasy i potoki organicheskogo ugleroda v ekosisteme spelogo sosnyaka chernichnogo Srednej tajgi [Reserves and flows of organic carbon in the ecosystem of ripe blueberry pine of the Middle taiga] // Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian forest journal]. 2017. No 2. P. 70–80. doi: 10.15372/SJFS20170208.

8. Podvezennaya M.A., Ryzhova I.M. Izmenchivost' sodержaniya i zapasov ugleroda v pochvah lesnykh biogeocenozov Yuzhnoj tajgi [Variability of carbon content and reserves in soils of forest biogeocenoses of the Southern taiga] // Lesovedenie [Lesovedenie]. 2011. No 1. P. 52–60.

9. Pristova T.A. Skorost' razlozheniya rastitel'nogo opada v listvennykh nasazhdeniyakh poslerubochnogo proiskhozhdeniya v usloviyakh srednej tajgi Respubliki Komi [The rate of decomposition of plant litter in deciduous plantings of post-harvest origin in the conditions of the middle taiga of the Komi Republic] // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva [Proceedings of the St. Petersburg scientific research institute of forestry]. 2020. No 3. P. 62–72. doi:

10.21178/2079-6080.2020.3.62.

10. Puryaev A.S. Pochvenno-ekologicheskie funktsii zashchitnykh lesnykh nasazhdenij Predvolzh'ya Respubliki Tatarstan [Soil-ecological functions of protective forest plantations of the Volga region of the Republic of Tatarstan]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Kazan, 2006. 21 p.

11. Rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 30.06.2017 No 20-r (ed. 20.01.2021) «Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema pogloshcheniya parnikovyykh gazov» [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation № 20-r 30.06.2017 (ed. 20.01.2021) “On approval of methodological guidelines for quantifying the volume of greenhouse gas uptake”]

12. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii o vnesenii proekta federal'nogo zakona «Ob ogranichenii vybrosov parnikovyykh gazov» ot 20.02.2021. [Order of the Government of the Russian Federation on the introduction of the draft federal law “On limiting Greenhouse Gas emissions” dated 20.02.2021]. No 1542p-P11.

13. Rogova T.V., Mangutova L.A., Lyubina O.E., Farkhutdinova S.S. Klassifikatsiya rastitel'nogo pokrova Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika na landshaftno-ekologicheskoy osnove [Classification of the vegetation cover of the Raifa section of the Volga-Kama Reserve on a landscape-ecological basis] // Trudy Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika [Proceedings of the Volga-Kama State Nature Reserve]. Kazan, 2005. Issue. 6. P. 213–240.

14. Taisin A.S. Raifskij les v sostave boreal'nykh lesov Evrazii [Raifa forest as part of the boreal forests of Eurasia]. Kazan: Kazan State University, 2008. 252 p.

15. Uldanova R.A. Produktivnost' i pochvennye usloviya proizrastaniya lesov pravoberezh'ya reki Volgi Respubliki Tatarstan [Productivity and soil conditions of forest growth on the right bank of the Volga River of the Republic of Tatarstan]: Summary of PhD (Cand. of Agricul.). Kazan, 2017. 24 p.

16. Ufimtsev V.I., Egorova I.N. Rol' rastitel'nogo opada v formirovanii fitogennykh polej sosny obyknovennoj na tekhnogennykh elyuviyah Kuzbassa [The role of plant litter in the formation of phytogenic fields of scots pine on technogenic eluvium of Kuzbass] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of modern natural science]. 2016. No 4. P. 116–120.

17. Fomicheva O.A. Ocenka chislennosti i struktury biomassy mikroorganizmov v Al-Fe gumusovykh podzolakh korennykh lesov Kol'skogo poluostrova [Estimation of the number and structure of microbial biomass in Al-Fe humus podzols of indigenous forests of the Kola Peninsula]: Summary of PhD (Cand. of Biol.). Moscow, 2008. 24 p.

18. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G. Podstilki lesnoj zony Rossii. Svidetel'stvo o registracii bazy dannykh RU 2018621165 [Litter of the forest zone of Russia. Certificate of registration of the database RU 2018621165], 02.08.2018.

19. Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V. Zapasy ugleroda v podstilkakh lesov Rossii [Carbon reserves in the litter of forests of Russia] // Lesovedenie [Forest science]. 2007. No 6. P. 114–121.

Alexandrova A.B., Kulagina V.I., Ivanov D.V., Malanin V.V., Marasov A.A. **Assessment of carbon reserves in forest litter of the Raifa area of Volzhsko-Kamsky state natural biosphere reserve.**

Numerical characteristics of carbon stocks in the litter of different-age biogeocenoses of the Raifa sec-

tion of the Volga-Kama Biosphere Reserve are given. Carbon reserves in the litter of various types of forests are variable and on average equal: birch forests 4.1 tC/ha, linden forests 4.8 tC/ha, pine forests 12.9 tC/ha.

Keywords: carbon reserves; carbon sequestration; forest litter; Volzhsko-Kamsky state nature biosphere reserve.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 03.04.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 26.04.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 31.04.2023

Информация об авторах

Александрова Асель Биляловна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: adabl@mail.ru.

Кулагина Валентина Ивановна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: viksoil@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Маланин Виталий Викторович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: wizzle13@yandex.ru.

Марасов Антон Александрович, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: OwlTravolta@yandex.ru.

Information about the authors

Asel B. Alexandrova, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: adabl@mail.ru.

Valentina I. Kulagina, Ph.D. in Biology, Head of Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: viksoil@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: water-rf@mail.ru.

Vitalii V. Malanin, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: wizzle13@yandex.ru.

Anton A. Marasov, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya St., Kazan, Russia, 420087, E-mail: OwlTravolta@yandex.ru.



А.А. Утомбаева, А.А. Вершинин, Э.Р. Зайнулгабидинов,
И.В. Князев, А.М. Петров

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, semionova.alin@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

В лабораторных условиях изучено влияние термомеханически обработанного гранулированного осадка городских сточных вод на дыхательную активность рекультивируемой нефтезагрязненной серой лесной среднесуглинистой почвы. Представлены основные характеристики гранулированного осадка сточных вод, сведения о влиянии содержания нефтепродуктов на скорость базального и субстрат-индуцированного дыхания, значения коэффициента микробного дыхания почвенных образцов, инкубируемых с гранулятом или без него. Приведены данные о влиянии выращивания растений на эффективность деструкции поллютанта и биохимическую активность почвы, содержащей гранулят осадка сточных вод. Установлено, что внесение гранулированного осадка из расчета 10 т/га в почву, содержащую 2.7, 6.1, 14.4 и 19.7 г/кг нефтепродуктов, приводит к интенсификации окислительных процессов, снижает токсическое действие, способствует повышению устойчивости почвенного микробиоценоза. В присутствии гранулята при концентрации нефтепродуктов 6.1–19.7 г/кг эффективность их деструкции в 1.7–2.5 раза выше, чем без него, что подтверждает перспективность использования осадков сточных вод для рекультивации нефтезагрязненных почв.

Ключевые слова: осадки сточных вод; почва; нефтепродукты; дыхательная активность; рекультивация.

DOI:<https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.63.69>

Введение

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами является экологической проблемой мирового уровня. В литературе подробно рассмотрены изменения свойств и характеристик почв при их техногенном загрязнении нефтяными углеводородами. Показано, что под воздействием сырой нефти и продуктов ее переработки изменяются не только физико-химические, но и биологические характеристики почв, нарушается структура бактериальных сообществ, снижается таксономическое разнообразие, численность и биомасса почвенных микроорганизмов (Анчугова и др., 2016).

Восстановление подвергшихся нефтяному загрязнению почв предполагает выполнение комплекса работ по технической и биологической рекультивации. На этапе технической рекультивации осуществляется подготовка земель к последующему целевому использованию, биологическая рекультивация предусматривает проведение агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на восстановление плодородия нарушенных земель (ГОСТ Р 59057-2020). Наиболее перспективными являются биологические методы рекультивации. Высокая эффективность,

экономичность и экологичность методов биоремедиации увеличивает их востребованность для широкого спектра органических загрязнителей, включая углеводороды нефти (Вершинина и др., 2021; Гилязов, Гайсин, 2003; Киреева и др., 2001; Alotaibi et al., 2021; Zhang et al., 2012).

В настоящее время на очистных сооружениях МУП «Водоканал» г. Казани внедрена технология термомеханической обработки осадков сточных вод, представляющих собой смесь избыточного активного ила и осевших в первичных отстойниках веществ. В результате обработки образуется гранулированный продукт (далее – «гранулят»), который характеризуется высоким содержанием биологически доступных органических веществ, отсутствием условно патогенной и патогенной микрофлоры, устойчивостью к воздействию влаги. Гранулят сертифицирован как органическое удобрение (Экологический ..., 2022) и может быть использован для биологической рекультивации нефтезагрязненных почв в качестве стимулятора почвенных микробиологических процессов (Утомбаева и др., 2023).

Цель исследования – изучить влияние внесения гранулированного осадка сточных вод на

дыхательную активность серой лесной почвы в зависимости от уровня нефтяного загрязнения, определить эффективность его применения при биологической рекультивации почв.

Материалы и методы исследования

В работе использована серая лесная среднесуглинистая почва (табл. 1), гранулят термомеханически обработанного осадка сточных вод МУП «Водоканал» г. Казани (табл. 2).

Образцы серой лесной почвы были искусственно загрязнены разными дозами парафинистой, сернистой смолистого типа нефтью Ямашинского месторождения (Республика Татарстан). После трехнедельного выветривания почвенные образцы с разным содержанием нефтепродуктов (НП) были разделены на три части, в две из которых был внесен гранулят из расчета 10 т/га.

Исследования включали три параллельных опыта, которые с учетом эффектов

биоаугментации и биостимуляции аборигенной микрофлоры при внесении гранулята условно были обозначены как: Т – техническая рекультивация; М – микробиологическая рекультивация; ФМ – фито-микробиологическая рекультивация (табл. 3). В опыте Т контролем (К) служила незагрязненная серая лесная почва, в опытах М и ФМ – незагрязненная серая лесная почва с гранулятом.

В качестве опытных емкостей использовали пластиковые горшочки диаметром 11 см и объемом 550 мл, содержащие 400 г почвы. Количество повторностей в каждом варианте – 3. Инкубирование осуществляли при температуре 19–25°C, влажности 20–25%, 16-часовом световом дне с интенсивностью освещения 4000 люкс. В ходе инкубации пробы опытов Т и М еженедельно перемешивали.

Содержание НП в исследуемых образцах определяли ИК-спектрометрическим методом на анализаторе КН-2м (ПНД Ф 16.1.2.2.22–98). В

Таблица 1. Основные характеристики серой лесной среднесуглинистой почвы
Table 1. Main characteristics of gray forest medium-carbonaceous soil

Гумус, % Humus, %	$P_{\text{подв.}}$ $P_{\text{mob.}}$	$K_{\text{подв.}}$ $K_{\text{mob.}}$	$pH_{\text{водный}}$ pH_{aqueous}	$N_{\text{общ.}}, \%$ $N_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{общ.}}, \%$ $P_{\text{tot.}}, \%$
	мг/г / mg/g				
4.4	103	81	6.3	0.21	0.07

Таблица 2. Основные характеристики гранулята осадка сточных вод
Table 2. Main characteristics of granulate sludges

Влажность, % Moisture, %	Орг. в-во, % Organic matter, %	Зольность, % Ash content, %	$N_{\text{общ.}}, \%$ $N_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{общ.}}, \%$ $P_{\text{tot.}}, \%$	$K_{\text{общ.}}, \%$ $K_{\text{tot.}}, \%$	$P_{\text{подв.}}, \text{мг/кг}$ $P_{\text{mob.}}, \text{mg/kg}$	$pH_{\text{сол.}}$ pH_{salt}	Класс опасности Hazard class
6.3	60.4	39.6	3.0	1.5	0.18	2000	6.2	IV

Таблица 3. Варианты опытов
Table 3. Variants of experiments

Варианты опытов / Variants of experiments		
Т	М	ФМ
Незагрязненные и загрязненные нефтью почвенные образцы	Незагрязненные и загрязненные нефтью почвы, содержащие гранулят из расчета 10 т/га	
42-суточная инкубация в условиях перемешивания и увлажнения	42-суточная инкубация в условиях перемешивания и увлажнения	42-суточное культивирование растений в условиях увлажнения

исходных опытных образцах оно составляло: вариант В1 – 2.7 г/кг, вариант В2 – 6.1 г/кг, вариант В3 – 14.4 г/кг, вариант В4 – 19.7 г/кг.

В основу опыта ФМ была положена описанная в ГОСТ Р ИСО 22030-2009 методика. С учетом результатов ранее проведенных исследований (Утомбаева и др., 2022), в нем были использованы два вида растений: однодольное – рожь посевная (*Secale cereale* L.) и двудольное – вика посевная (*Vicia sativa* L.), смесь которых высевали в соотношении 1:1 (6+6 растений). Для выравнивания условий освещения местоположение вегетационных сосудов ежедневно меняли, варианты располагали рандомно. Через 14 суток инкубации в каждой емкости оставляли по 6 растений (3+3). На 42 сутки эксперимента растения удаляли, почвенные образцы анализировали.

Интенсивность почвенного дыхания определяли газохроматографическим методом (Вершинин и др., 2011) на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2», колонка длиной 3.0 м, внутренний диаметр 3 мм, адсорбент Hayesep N 80/100. В качестве детектора был использован катарометр. Оценивали следующие параметры дыхательной активности почв: скорость базального дыхания ($V_{\text{базал}}$), скорость субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\text{сид}}$), коэффициент микробного дыхания ($Q_r = V_{\text{базал}}/V_{\text{сид}}$). Интенсивность дыхания выражали в $\text{мкг CO}_2/\text{г сухой почвы в час}$.

Результаты и их обсуждение

При изучении влияния гранулированного осадка сточных вод на дыхательную активность серых лесных почв и эффективность деструкции НП были рассмотрены два подхода к биологической рекультивации: первый – внесение в загрязненные нефтью образцы почв гранулята (опыт М), второй – внесение в образцы почв гранулята и культивирование в них смеси высших растений (опыт ФМ). Параллельно был поставлен опыт по технической рекультивации (Т), без добавления гранулята.

Показатели почвенного дыхания широко применяются при оценке состояния их микробного пула (Никитин и др., 2022). Величина $V_{\text{базал}}$ отражает доступность питательных веществ для почвенной микрофлоры. Высокие ее показатели указывают на интенсивные процессы окисления присутствующих в почве органических субстратов.

После 42-суточной инкубации интенсивность дыхания незагрязненной, подвергшейся рыхлению и увлажнению почвы, составляла 4.69 $\text{мкг CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$. Присутствие гранулята в опытах М и ФМ в равной степени (в 1.6 раза) увеличивало $V_{\text{базал}}$ (рис. 1).

В опыте по технической рекультивации при по-

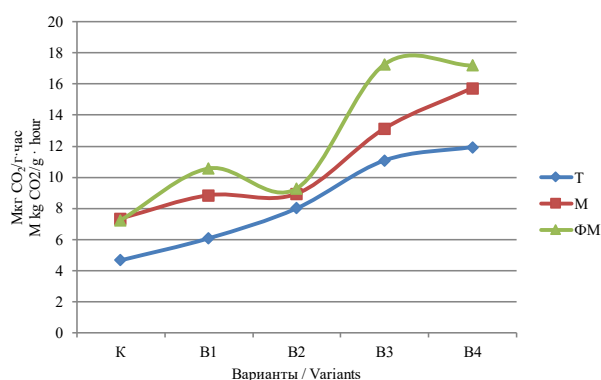


Рис. 1. Базальное дыхание почв

Fig. 1. Soil basal respiration

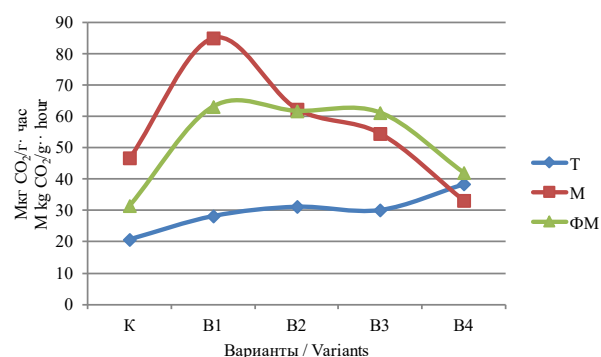


Рис. 2. Субстрат-индуцированное дыхание почв

Fig. 2. Soils substrate-induced respiration

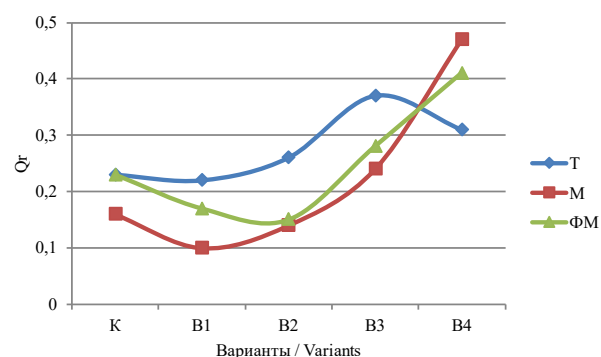


Рис. 3. Коэффициент микробного дыхания почв

Fig. 3. Soil microbial respiration quotient

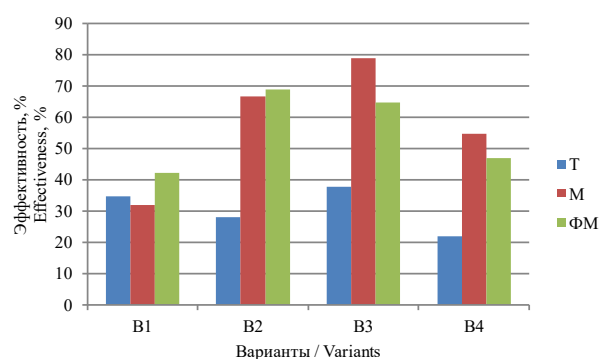


Рис. 4. Эффективность деструкции НП в почвах

Fig. 4. Petroleum hydrocarbons destruction efficiency in soils

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между остаточным содержанием НП и биохимическими показателями почв

Table 4. Correlation between the residual content of petroleum hydrocarbons and soil biochemical parameters

Показатель / Indicator	Опыт / Experiment		
	Т	М	ФМ
Базальное дыхание / Basal respiration	0.94	0.89	0.83
Субстрат индуцированное дыхание / Substrate induced respiration	0.90	-0.86	-0.94
Q _г	0.66	0.98	0.99

вышении содержания НП в почвах наблюдался практически линейный рост $V_{\text{базал}}$, что закономерно, так как внесение нефти, как правило, способствует росту почвенного дыхания (Благодатская, Ананьева, 1996; Киреева и др., 2001; Петров и др., 2016). При проведении фито-микробиологической рекультивации базальное дыхание почв возрастало относительно опытов Т и М как при низкой (вариант В1), так и при высоких концентрациях НП (варианты В3 и В4).

Скорость субстрат-индуцированного дыхания, характеризующая активность микробного пула незагрязненной почвы после инкубирования, составляла 20.77 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$. Внесение гранулята способствовало повышению $V_{\text{сид}}$ в опытах М и ФМ до 31.56 и 46.67 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$, соответственно (рис. 2). Наименьшие значения $V_{\text{сид}}$ инкубированных почвенных образцов обнаружены в опыте по технической рекультивации (28.22–38.37 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$). В опыте Т увеличение концентрации НП в почве приводило к росту исследуемого показателя.

Максимально высокие значения субстрат-индуцированного дыхания зарегистрированы в варианте В1 опыта по микробиологической рекультивации (84.99 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$) с последующим снижением по мере увеличения содержания НП в почве. В отсутствии периодического перемешивания почвы в варианте В1 опыта ФМ значение $V_{\text{сид}}$ было ниже (63.26 мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$), однако в вариантах В3 и В4 $V_{\text{сид}}$ была на 12.5 и 27.0% выше, чем в опыте М, что указывает на снижение токсического пресса высоких концентраций НП на микробный пул при фито-микробиологической рекультивации нефтезагрязненных почв. В варианте В4 во всех опытах уровень $V_{\text{сид}}$ почвенных образцов имел близкие значения (рис. 2).

Важным эколого-физиологическим показателем, отражающим степень воздействия неблагоприятных климатических и антропогенных факторов на почву и позволяющим оценить стабильность сообщества почвенных микроорганизмов, является коэффициент микробного дыхания (Q_r).

Считается, что при благоприятных климатических условиях и при отсутствии антропогенных воздействий величина Q_r находится в диапазоне 0.1–0.3. Высокие, приближающиеся к 1.0 и выше, значения Q_r указывают на то, что в почве нарушен естественный ход обменных процессов, а система микроорганизмов неустойчива (Благодатская, Ананьева, 1996).

Значения Q_r контрольных образцов серой лесной почвы варьировали в интервале 0.16–0.23 (рис. 3). При технической рекультивации в вариантах В1 и В2 микробное сообщество находилось в состоянии, которое характеризуется как «нормальное», при микробиологической и фито-микробиологической рекультивации в диапазон «нормальное» состояние входит также вариант В3. При этом в опытах М и ФМ в вариантах В1–В3 значения Q_r были ниже, чем при технической рекультивации, что указывает на повышение устойчивости микробиоты к действию антропогенных факторов в присутствии гранулята. В конце эксперимента в образцах, содержащих максимальные концентрации НП (вариант В4), значения Q_r были ниже 0.5, что свидетельствует о возможности восстановления свойств почвы в короткий срок при минимальных восстановительных мероприятиях (Вершинин и др., 2017).

Определение НП в почвенных образцах по завершению эксперимента показало, что в присутствии гранулята в вариантах В2–В4 эффективность их деструкции была в 1.7–2.5 раза выше, чем в образцах без гранулята (рис. 4), что указывает на перспективность его использования для рекультивации нефтезагрязненных почв.

Менее эффективная деструкция НП в опыте ФМ, по сравнению с М, вероятно связана с отсутствием перемешивания почвы при культивировании растений.

Сопоставление остаточного содержания НП и дыхательной активности почв показало, что скорость базального дыхания во всех опытах напрямую определялась концентрацией поллютанта, а скорость субстрат-индуцированного дыхания в

опытах с гранулятом и без него имела разнонаправленную зависимость (табл. 4). Коэффициент достоверности аппроксимации экспериментальных значений Q_r в опытах М и ФМ составлял 0.96 ($y=0.0483x \cdot 0.0462$) и 0.98 ($y=0.0287x \cdot 0.1163$), что позволяет прогнозировать уровень стабильности почвенного микробоценоза в присутствии гранулята в зависимости от остаточного содержания НП в почвах.

Заключение

Внесение термически обработанного осадка сточных вод интенсифицирует окислительные процессы в загрязненных нефтью серых лесных почвах, повышая эффективность деструкции нефтяных углеводородов. При концентрации в почвах НП 6.1–19.7 г/кг эффективность их деструкции в присутствии гранулята возрастает в 1.7–2.5 раза, что указывает на возможность использования термически обработанных осадков сточных вод для рекультивации почв при различных уровнях загрязнения. При содержании НП до 14.4 г/кг гранулят обеспечивает высокие показатели активности почвенного микробного сообщества. По мере роста концентраций НП протекторные свойства вносимых в почву осадков сточных вод постепенно нивелируются.

Культивирование растений в процессе биологической рекультивации почв повышает доступность органического субстрата и снижает токсическое действие НП на почвенные микроорганизмы при их концентрации до 6.1 г/кг. При этом не выявлено существенных различий в показателях эффективности деструкции НП и дыхательной активности почв при выращивании растений и без них.

Список литературы

1. Анчугова Е.М., Мелехина Е.Н., Маркарова М.Ю., Шемелинина Т.Н. Подходы к оценке методов рекультивации нефтезагрязненных почв // Почвоведение. 2016. №2. С. 257–260. doi: 10.7868/S0032180X16020027.
2. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. №11. С. 1341–1346.
3. Вершинин А.А., Петров А.М., Игнатьев Ю.А., Шагидуллин Р.Р. Дыхательная активность дерново-карбонатной почвы, загрязненной дизельным топливом // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №7. С. 168–174.
4. Вершинин А.А., Петров А.М., Князев И.В. Изменение содержания углерода микробной биомассы в условиях длительного нефтяного загрязнения темно-серой лесной почвы // Материалы Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие регионов: опыт, проблемы, перспективы». Казань: Изд-во АН РТ, 2017. С. 234–237.
5. Вершинина И.А., Лебедев С.В., Галактионова Л.В. Современные подходы к восстановлению загрязненных почв // Вопросы современной науки. М.: Интернаука, 2021. Т. 68. С. 9–31. doi: 10.32743/25001949.2021.68.313842.

6. Гилязов М.Ю., Гайсин И.А. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. Казань: Фэн, 2003. 228 с.

7. ГОСТ Р 59057–2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель.

8. ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений.

9. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахов А.М. Биологическая активность нефтезагрязненных почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.

10. Никитин Д.А., Семенов Т.И., Чернов Н.А., Ксенофонтова Н.А., Железнова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (Обзор) // Почвоведение. 2022. №2. С. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095.

11. Петров А.М., Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Акайкин Д.В., Тарасов О.Ю. Динамика эколого-биологических характеристик дерново-подзолистых почв в условиях длительного воздействия нефтяного загрязнения // Почвоведение. 2016. №7. С. 848–856. doi: 10.7868/S0032180X16050130.

12. ПНД Ф 16.1.2.2.22–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органо-генных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии.

13. Утомбаева А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Петров А.М. Скрининг растений для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1. С. 68–75. doi: https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75.

14. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Вершинин А.А., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Влияние гранулята осадка сточных вод на характеристики серой лесной почвы и продуктивность растений // Российский журнал прикладной экологии. 2023. №1. С. 52–60. doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.52.60.

15. Экологический сертификат соответствия № RA.RU.11HA15.П.00114 «Удобрение органическое гранулированное на основе осадков сточных вод, изготавливаемое серийно по ТУ 37.00.20-001-03317648-2022 на очистных сооружениях канализации г. Казани». Выдано ООО «БИФАР-Экология». Срок действия 16.08.2022–15.08.2025 г.

16. Alotaibi F., Hijri M., St-Arnaud M. Overview of approaches to improve rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils // Applied microbiology. 2021. Vol. 1, №2. P. 329–351. doi: 10.3390/applmicrobiol1020023

17. Zhang, X., Xu, D., Zhu, C., Lundaa, T., Scherr, K.E. Isolation and identification of biosurfactant producing and crude oil degrading *Pseudomonas aeruginosa* strains // Chemical engineering journal. 2012. Vol. 209. P. 138–146. doi: 10.1016/j.cej.2012.07.110.

References

1. Anchugova E.M., Melexina E.N., Markarova M.Yu., Shemelinina T.N. Podxody k ocnke metodov rekul'tivacii neftezagryaznennyx pochv [Approaches to evaluating methods for remediation of oil-contaminated soils] // Pochvovedenie [Soil science]. 2016. No 2. P. 257–260. doi: 10.7868/S0032180X16020027.
2. Blagodat'skaya E.V., Anan'eva N.D. Ocnka ustojchivosti mikrobny'x soobshhestv v processe razlozheniya pollyutantov v pochve [Assessment of microbial community resilience in the decomposition of pollutants in soil] // Pochvovedenie [Soil science]. 1996. No 11. P. 1341–1346.
3. Vershinin A.A., Petrov A.M., Ignat'ev Yu.A., Shagid-

ullin R.R. Dy`xatel'naya aktivnost' dernovo-karbonatnoj pochvy, zagryaznennoj dizel'nym toplivom [Respiratory activity of sod-carbonate soil contaminated with diesel fuel] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Annals of Kazan technological university]. 2011. No 7. P. 168–174.

4. Vershinin A.A., Petrov A.M., Knyazev I.V. Izmenenie soderzhaniya ugleroda mikrobnoy biomassy v usloviyax dlitel'nogo neftyanogo zagryazneniya temno-seroj lesnoj pochvy [Changes in the carbon content of microbial biomass under conditions of long-term oil contamination of dark gray forest soil] // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ustoichivoe razvitiye regionov: opyt, problemy, perspektivy». Kazan: AN RT, 2017. P. 234–237.

5. Vershinina I.A., Lebedev S.V., Galaktionova L.V. Sovremennye podkhody k vosstanovleniyu zagryaznennykh pochv [Modern approaches to remediation of contaminated soils] // Voprosy sovremennoy nauki. Moscow: Internauka, 2021. Vol. 68. P. 9–31. doi: 10.32743/25001949.2021.68.313842.

6. Gilyazov M.Yu., Gajsin I.A. Agroekologicheskaya karakteristika i priemy rekultivatsii neftezagryaznennykh chernozemov Respubliki Tatarstan [Agroecological characteristics and reclamation methods for oil contaminated chernozems in the Republic of Tatarstan]. Kazan: Fen, 2003. 228 p.

7. GOST R 59057–2020. Okhrana okruzhayushhej sredy. Zemli. Obshhie trebovaniya po rekultivatsii narushennykh zemel' [Environmental protection. Earth. General requirements for the reclamation of disturbed lands].

8. GOST R ISO 22030–2009. Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Xronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshix rastenij. [Soil Quality. Biological Methods. Chronic toxicity to higher plants].

9. Kireeva N.A., Vodop'yanov V.V., Miftaxov A.M. Biologicheskaya aktivnost' neftezagryaznennykh pochv [Biological activity of oil polluted soils]. Ufa: Gilem, 2001. 376 p.

10. Nikitin D.A., Semenov T.I., Chernov N.A., Ksenofontova N.A., Zheleznova A.D., Ivanova E.A., Xitrov N.B., Stepanov A.L. Mikrobiologicheskie idikatory ekologicheskix funkciy pochv (Obzor) [Microbiological indicators of ecological functions of soils (Review)] // Pochvovedenie [Soil science]. 2022. No 2. P. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095.

11. Petrov A.M., Vershinin A.A., Karimullin L.K., Akajkin D.V., Tarasov O.Yu. Dinamika ekologo-biologicheskixarakteristik dernovo-podzolistyx pochv v usloviyax dlitel'nogo vozdejstviya neftyanogo zagryazneniya [Dynamics of ecologo-biological characteristics of sod-podzolic soils under prolonged exposure to oil pollution] // Pochvovedenie [Soil science]. 2016. No 7. P. 848–856. doi: 10.7868/S0032180X16050130.

12. PND F 16.1.2.2.22–98. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v mineral'nyx, organogennyx, organo-mineral'nyx pochvax i donnyx otlozheniyax metodom IK-spektrometrii [Methods for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by infrared spectrometry].

13. Utombaeva A.A., Zajnulgabidinov E.R., Kuznecova T.V., Petrov A.M. Skringing rastenij dlya fitoremediacii neftezagryaznennykh pochv [Screening of plants for phytoremediation of oil contaminated soils] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 1. P. 68–75. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75>.

14. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zajnulgabidinov E.R., Kuznecova T.V., Vershinin A.A., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. Vliyanie granulyata osadka stochnykh vod na karakteristiki seroj

lesnoj pochvy i produktivnost' rastenij [Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2023. No 1. P. 52–60. doi:10.24852/2411-7374.2023.1.52.60.

15. Ekologicheskij sertifikat sootvetstviya №RA.RU. 11NA15.P.00114 «Udobrenie organicheskoe granulirovannoe na osnove osadkov stochnykh vod, izgotavlivayemoye serijno po TU 37.00.20-001-03317648-2022 na ochistnykh sooruzheniyah kanalizatsii g. Kazani» [Organic granulated fertilizer based on sewage sludge, serially produced according to TU 37.00.20-001-03317648-2022 at sewage treatment facilities in Kazan].

16. Alotaibi F., Hijri M., St-Arnaud M. Overview of approaches to improve rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils // Applied microbiology. 2021. Vol. 1, No 2. P. 329–351. doi: 10.3390/applmicrobiol1020023.

17. Zhang, X., Xu, D., Zhu, C., Lundaa, T., Scherr, K.E. Isolation and identification of biosurfactant producing and crude oil degrading *Pseudomonas aeruginosa* strains // Chemical engineering journal. 2012. Vol. 209. P. 138–146. doi: 10.1016/j.cej.2012.07.110.

Utombaeva A.A., Vershinin A.A., Zajnulgabidinov E.R., Knyazev I.V., Petrov A.M. **Study of the possibility of using sewage sludge for biological reclamation of oil-contaminated gray forest soils.**

The effect of thermomechanically treated granular urban sewage sludge on the respiratory activity of recultivated oil-contaminated gray forest medium loamy soil was studied in laboratory conditions. The main characteristics of granular sewage sludge, information on the effect of the content of petroleum products on the rate of basal and substrate-induced respiration, the values of the microbial respiration coefficient of soil samples incubated with or without granulate are presented. Data on the effect of plant cultivation on the efficiency of pollutant destruction and the biochemical activity of the soil containing granulate sewage sludge are presented. It has been established that the introduction of granular sediment at the rate of 10 t/ha into soils containing 2.7, 6.1, 14.4 and 19.7 g/kg of petroleum products leads to the intensification of oxidative processes, reduces the toxic effect, and increases the resistance of soil microbiocenosis to pollutants. In the presence of granulate at a concentration of oil products of 6.1–19.7 g/kg, the efficiency of their destruction is 1.7–2.5 times higher than without it, which confirms the promise of using sewage sludge for the recultivation of oil-contaminated soils.

Keywords: wastewater sludge; soil; petroleum hydrocarbons; microbial respiration; recultivation.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 03.02.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 16.03.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 22.03.2023

Информация об авторах

Утомбаева Алина Александровна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Вершинин Анатолий Андреевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Зайнулгабидинов Эрик Ренатович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: comp05@mail.ru.

Князев Игорь Владимирович, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: Kneze3@yandex.ru.

Петров Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: zpam2@rambler.ru.

Information about the authors

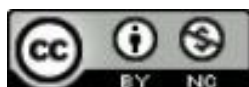
Alina A. Utombaeva, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Anatoly A. Vershinin, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya str., Kazan, 420087, Russia, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Erik R. Zainulgabidinov, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: comp05@mail.ru.

Igor V. Knyazev, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya str., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Kneze3@yandex.ru.

Andrey M. Petrov, Ph.D. in Biology, Head of the Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: zpam2@rambler.ru.



А.В. Егорова, А.Ф. Гатиятуллина, Т.Б. Калининкова

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, tbkalinnikova@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ НЕМАТОЦИДНОЙ АКТИВНОСТИ ПИРАНТЕЛА

В экспериментах с двумя видами свободноживущих почвенных нематод – *Caenorhabditis elegans* и *Caenorhabditis briggsae* – исследована динамика нематоцидной активности пирантела. Пирантел – это агонист никотиновых рецепторов L-субтипа, который применяется для лечения различных гельминтозов у человека и животных. В работе выявлены особенности динамики токсического действия пирантела на организмы *C. elegans* и *C. briggsae*. Пирантел в диапазоне концентраций 62.5–250 мкМ в первые 60 мин. инкубации вызывал дозозависимые нарушения поведения *C. elegans*. Увеличение времени экспозиции до 90–180 мин. приводило к восстановлению нормальной локомоции у части нематод этого вида. Более длительная экспозиция к пирантелу (240–360 мин.) вновь уменьшала долю *C. elegans* с нормальной локомоцией. *C. briggsae* были более чувствительны к негативному действию пирантела, чем *C. elegans*. Снижение доли нематод с нормальной локомоцией отмечалось в первые 90 мин. инкубации с пирантелом. Более длительная экспозиция вызывала незначительное увеличение доли нематод с нормальной локомоцией только при концентрации пирантела 125 мкМ. При более низкой концентрации (62.5 мкМ) доля нематод, не способных поддерживать координацию движений тела при плавании, оставалась на одном уровне при увеличении времени экспозиции до 360 мин. Повторное введение пирантела в среду через 60 мин. после начала эксперимента приводило к резкому снижению доли *C. elegans* с нормальной локомоцией. Возможность быстрой адаптации нематод к пирантелу при его однократном приеме, выявленная в этой работе, подтверждает необходимость строгого соблюдения рекомендованных дозировок при использовании антигельминтных препаратов для предотвращения развития лекарственной устойчивости гельминтов.

Ключевые слова: *Caenorhabditis elegans*; *Caenorhabditis briggsae*; антигельминтные препараты; пирантел.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.2.70.76>

Введение

В структуре заболеваемости населения гельминтозы занимают второе место после гриппа и острых респираторных заболеваний. По данным официальной статистики, гельминтозы ежегодно являются причиной смерти 135 тысяч человек. Однако, по мнению ряда специалистов, реальная зараженность населения гельминтами превышает данные официальной статистики по меньшей мере в 10 раз (Кляритская и др., 2010). От гельминтозов, передающихся через почву, страдают не менее одного миллиарда человек, онхоцеркозом и лимфатическим филяриозом болеют примерно 40 и 120 миллионов человек (Hahnel et al., 2020; Weaver et al., 2017). У пациентов, зараженных гельминтами, наблюдается снижение иммунитета, различные аллергические реакции, нарушения работы желудочно-кишечного тракта, анемия, неврологические проявления и нарушение эндокринного гомеостаза. В комплексной терапии гельминтозов главную роль играет применение синтетических антигельминтных

препаратов. В настоящее время Всемирная организация здравоохранения рекомендует для лечения гельминтозов четыре препарата, два из которых (пирантел и левамизол) являются агонистами никотиновых рецепторов ацетилхолина (н-холинорецепторов), а еще два – альбендазол и мебендазол относятся к бензимидазолам, антигельминтное действие которых определяется их способностью нарушать синтез β -тубулина, утилизацию глюкозы и угнетать образование АТФ (Dent, 2001; Ding et al., 2017; Holden-Dye, Walker, 2014; Weaver et al., 2017). При этом даже препараты одной химической группы отличаются по своей биологической активности и биодоступности. Например, электрофизиологическими исследованиями было показано, что агонисты н-холинорецепторов морантел, пирантел и левамизол имитируют действие ацетилхолина у *Ascaris suum* и *Caenorhabditis elegans* с убыванием активности в ряду: морантел = пирантел > левамизол > ацетилхолин (Holden-Dye, Walker, 2014). Биодоступность бензимидазола и левамизола в организмах

коз значительно ниже, чем в организмах овец. Соответственно для дегельминтизации коз необходима доза препаратов в 1.5–2 раза превышающая дозу, необходимую для дегельминтизации овец (Holden-Dye, Walker, 2014).

Одним из последствий длительного применения антигельминтных препаратов является появление устойчивости к ним. В настоящее время устойчивость гельминтов к лекарству рассматривается как снижение ответа популяции на использование препарата в течение длительного времени (Coles, 2006). При этом остается открытым вопрос о динамике чувствительности к препарату отдельных особей при его однократном применении. Ранее нами была показана быстрая адаптация *Caenorhabditis elegans* к низким (30 мкМ) дозам пирантела (Колсанова и др., 2011). Целью настоящей работы явилось изучение возможности адаптации нематод к высоким (до 250 мкМ) дозам пирантела в экспериментах с двумя близкородственными видами свободноживущих почвенных нематод – *Caenorhabditis elegans* и *Caenorhabditis briggsae*. *C. elegans* успешно используется для оценки биологической активности антигельминтных препаратов благодаря сходству строения тела, физиологии и нейробиологии с паразитическими нематодами. Преимуществами использования *C. elegans* при испытании фармакологических веществ, по сравнению с паразитическими нематодами, является безопасность для исследователя, простота и дешевизна выращивания в лаборатории, короткий жизненный цикл и возможность получения большого количества особей для эксперимента (Avila et al., 2012; Dent, 2001). *C. briggsae* используется как дополнительный к *C. elegans* модельный организм при изучении влияния факторов среды на организмы Metazoa. Эти виды очень сходны по морфологии, особенностям жизненного цикла и системы размножения (Baird, Chamberlin, 2006; Gupta et al., 2007).

Объекты и методы исследования

В работе использовали *C. elegans* линии дикого типа N2 и *C. briggsae* линии дикого типа AF16, полученные из Caenorhabditis Genetics Center. Нематод выращивали в чашках Петри (d=10 см) со стандартной средой выращивания (3 г/л NaCl, 17 г/л бактоагар, 2.5 г/л бактопептон, 5 мг/л холестерин, 1 мМ CaCl₂, 1 мМ MgSO₄, 25 мМ калийфосфатный буфер (pH 6.0)) (Brenner, 1974). Эксперименты проводили при 22°C с молодыми половозрелыми особями. Нематод отмывали от среды выращивания, бактерий и экзометаболитов как описано ранее (Kalinnikova et al., 2012,

2016) и рассаживали индивидуально в пробирки с буфером M9 (3 г/л KН₂РO₄, 6 г/л Na₂НРO₄, 5 г/л NaCl, 1 мМ MgSO₄) (Brenner, 1974). Для приготовления раствора пирантела использовали диметилсульфоксид, который в концентрации до 2% не оказывает негативного влияния на организмы нематод (Katiki et al., 2011). Пирантел добавляли в пробирки сразу после рассаживания нематод. Конечный объем среды инкубации 1 мл, концентрация диметилсульфоксида 0.5%. Критерием токсического действия пирантела служили нарушения моторной программы плавания нематод, индуцированного механическим стимулом. Эти нарушения проявлялись в утрате координации локомоторных мышц, необходимой для синусоидальных движений тела при плавании и неспособности поддерживать плавание в течение 10 с после стимула. Эксперименты проводили в четырех повторностях, для каждой концентрации пирантела использовали 30 нематод. Статистическую обработку проводили с использованием углового преобразования Фишера ϕ^* .

Результаты и их обсуждение

Пирантел в концентрации 62.5–250 мкМ вызывал дозозависимые нарушения поведения *C. elegans* в первые 60 мин. (рис. 1). Увеличение времени экспозиции до 90–180 мин. приводило к восстановлению нормальной локомоции у части нематод. Наиболее сильно это увеличение было выражено при концентрации пирантела 250 мкМ (рис. 1). Более длительная экспозиция (240–360 мин.) вновь уменьшала долю *C. elegans* с нормальной локомоцией (рис. 1).

C. briggsae были более чувствительны к негативному действию пирантела, чем *C. elegans* (рис. 1). Снижение доли нематод с нормальной локомоцией отмечалось в первые 90 мин. инкубации с пирантелом. Более длительная экспозиция вызывала незначительное увеличение доли нематод с нормальной локомоцией только при концентрации пирантела 125 мкМ. При более низкой концентрации (62.5 мкМ) доля нематод, не способных поддерживать координацию движений тела при плавании оставалась на одном уровне при увеличении времени экспозиции до 360 мин. (рис. 1).

Для проверки эффективности адаптации *C. elegans* к пирантелу были проведены эксперименты, в которых исследовалась реакция нематод на повторное введение антигельминтика. Для этого через 60 мин. после начала эксперимента в среду инкубации повторно добавляли пирантел. Концентрация препарата при этом увеличивалась в два раза по сравнению с исходной. Повышение

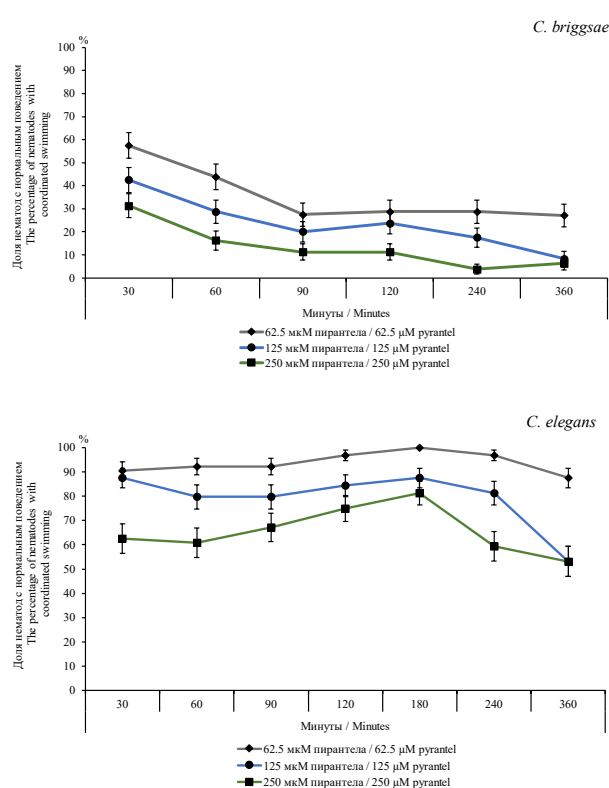


Рис. 1. Действие пирантела на локомоцию *C. elegans* и *C. briggsae*

Fig. 1. Pyrantel action on *C. elegans* and *C. briggsae* locomotion

концентрации пирантела с 250 мкМ до 500 мкМ и с 125 мкМ до 250 мкМ приводило к резкому снижению доли нематод с нормальной локомоцией (рис. 2). Повышение концентрации пирантела с 62.5 мкМ до 125 мкМ также вызывало снижение доли *C. elegans* с нормальной локомоцией, но это снижение было меньше, чем при первых двух концентрациях (рис. 2). Аналогичные эксперименты с *C. briggsae* не проводились, поскольку в первой серии опытов адаптация нематод этого вида к пирантелу была выражена слабее, чем в экспериментах с *C. elegans* (рис. 1).

Пирантел является одним из селективных агонистов никотиновых рецепторов L-субтипа (Dent, 2001; Gottshalk et al., 2005; Sleight, 2010). Ранее колоколообразная кривая «доза–эффект» была описана при действии пирантела на мышцы нематоды *Ascaris suum* (Harrow, Gratton, 1985). Выявленная нами зависимость изменения поведения *C. elegans* от времени экспозиции к пирантелу сходна с той, которая описана для никотина (Fleming et al., 1997). Развитие токсического действия никотина на *C. elegans* во времени ограничивается противоположно направленным процессом быстрой адаптации нематод к нему (Gottshalk et al., 2005).

Проведенные нами эксперименты позволяют

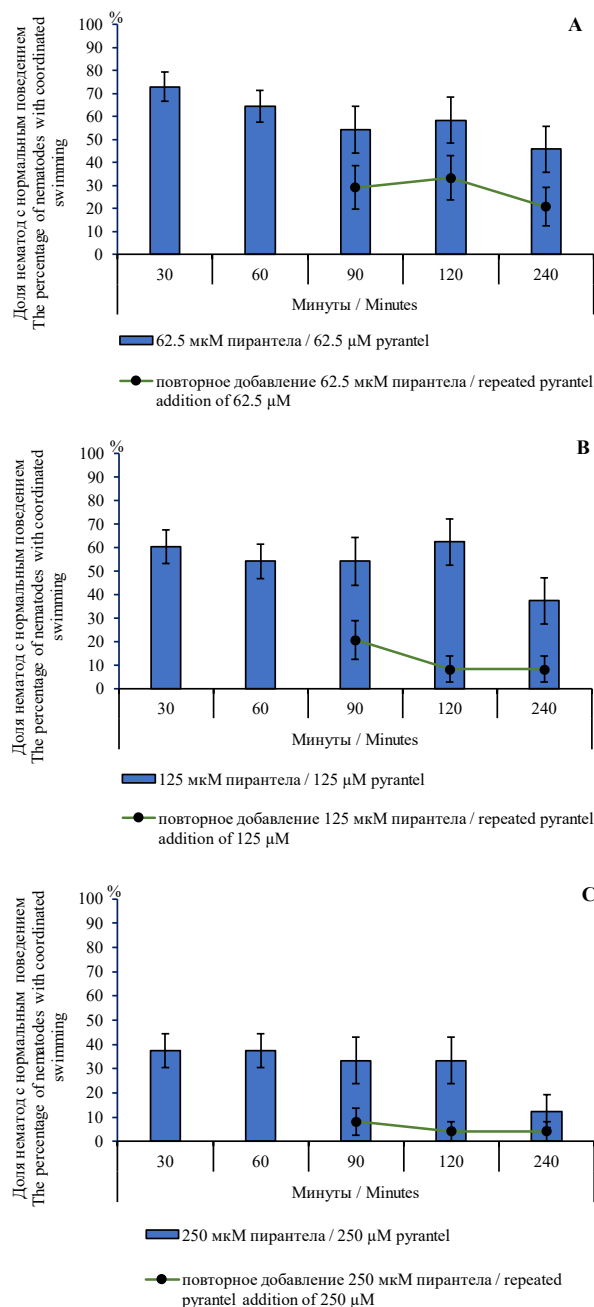


Рис. 2. Влияние повторного введения пирантела в среду инкубации на локомоцию *C. elegans*:

A – исходная концентрация пирантела 62.5 мкМ;
B – исходная концентрация пирантела 125 мкМ;
C – исходная концентрация пирантела 250 мкМ

Fig. 2. The influence of repeated pyrantel addition on *C. elegans* locomotion:

A – initial pyrantel concentration was 62.5 µM; B – initial pyrantel concentration was 125 µM; C – initial pyrantel concentration was 250 µM

сделать вывод о возможности быстрой адаптации нематод к пирантелу (рис. 1). При увеличении дозы пирантела повторным введением в среду инкубации чувствительность к нему восстанавливается (рис. 2). Выявленная нами динамика

действия пирантела на локомоцию *C. elegans* согласуется с результатами опубликованных ранее работ других авторов, посвященных исследованию действия антигельминтиков на организмы нематод этого вида. В работе (Weaver et al., 2017) показано, что пирантел в диапазоне концентраций 0.17–1700 мкМ не вызывал гибели *C. elegans* в течение трех суток экспозиции к нему. После семидневной экспозиции к пирантелу отмечалась дозозависимая гибель нематод. При концентрации препарата 1700 мкМ погибали почти 100% особей. При концентрациях пирантела 170, 17 и 1.7 мкМ погибало 75, 35 и 10% нематод соответственно. Нарушения спонтанной локомоции *C. elegans* появлялись через сутки при концентрации пирантела 170 и 1700 мкМ, через двое суток при концентрации пирантела 17 мкМ, и через трое суток при более низких концентрациях пирантела. В работе (Lycke et al., 2013) приведены результаты исследования действия на *C. elegans* агонистов н-холинорецепторов пирантела, левамизола, трибендимидина и метиридина. Наблюдения за чередованием и длительностью периодов покоя и спонтанной двигательной активности нематод показали, что при увеличении времени экспозиции к левамизолу, трибендимидину и метиридину длительность периодов иммобилизации возрастает, а продолжительность периодов спонтанной активности, напротив, убывает. При экспозиции *C. elegans* к пирантелу длительность периодов иммобилизации была наибольшей в начале эксперимента и уменьшалась по мере увеличения времени действия препарата. Длительность периодов спонтанной активности мало отличалась при действии всех исследованных препаратов. В этой же работе показано, что после 40-минутной экспозиции к пирантелу были непрерывно или периодически иммобилизованы 53.33 и 46.66% нематод соответственно, в то время как при действии других препаратов 20–60% *C. elegans* сохраняли постоянную двигательную активность до конца эксперимента (Lycke et al., 2013).

Различия в чувствительности к действию пирантела двух видов нематод – *C. elegans* и *C. briggsae* – могут обуславливаться особенностями их нервных систем. Пирантел является агонистом н-холинорецепторов L-субтипа. Ранее нами были выявлены различия в устойчивости лабораторных линий *C. elegans* и *C. briggsae* к превышению физиологического оптимума температуры (Kalinnikova et al., 2011), связанные с модуляцией как никотиновой, так и мускариновой холинергической трансмиссии (Kalinnikova et al., 2016). Более высокая, по сравнению с *C. elegans*, чувствительность *C. briggsae* к ионам меди, свинца и кадмия

также связана с различиями никотиновой холинергической трансмиссии (Егорова и др., 2021).

Заключение

В целом результаты, представленные в этой работе, показывают возможность быстрой адаптации *C. elegans* не только к низким (Колсанова и др., 2011), но и к высоким (до 250 мкМ) дозам пирантела уже при его однократном применении. Аналогичная динамика нематоцидной активности пирантела была выявлена нами и в экспериментах с *C. briggsae* при концентрации пирантела 125 мкМ. Причиной быстрой адаптации нематод к пирантелу может быть сокращение длительности периодов иммобилизации при увеличении экспозиции *C. elegans* к пирантелу, описанное в работе (Lycke et al., 2013). Возможность быстрой адаптации *C. elegans* и *C. briggsae* к пирантелу при его однократном приеме, выявленная в наших экспериментах, может отражать особенности динамики нематоцидной активности пирантела и в отношении других видов нематод. Это подтверждает необходимость строгого соблюдения рекомендованных дозировок при использовании антигельминтных препаратов, поскольку их применение в субтерапевтических дозах является существенным фактором, способствующим развитию лекарственной устойчивости гельминтов (Shalaby, 2013). Повторное применение пирантела повышает эффективность его антигельминтного действия, поскольку восстанавливает чувствительность нематод к препарату.

Список литературы

1. Егорова А.В., Калининкова Т.Б., Шагидуллин Р.Р. Токсическое действие меди, кадмия и свинца на свободноживущих почвенных нематод *Caenorhabditis elegans* и *Caenorhabditis briggsae* // Токсикологический вестник. 2021. №1. С. 43–46. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-1-43-46>.
2. Клярская И.Л., Вильцанюк И.А., Григоренко Е.И., Чернуха С.Н. Современные представления о лечении и диагностике гельминтозов // Крымский терапевтический журнал. 2010. №2. С. 144–147.
3. Колсанова Р.Р., Тимошенко А.Х., Гайнутдинов М.Х., Калининкова Т.Б. Действие левамизола и пирантела на поведение почвенных нематод *Caenorhabditis elegans* и *Caenorhabditis briggsae* // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2011. Т. 153, кн. 2. С. 180–189.
4. Avila D., Helmcke K., Aschner M. The *Caenorhabditis elegans* model as a reliable tool in neurotoxicology // Human & experimental toxicology. 2012. Vol. 31. P. 236–243. doi: 10.1177/0960327110392084.
5. Baird S.E., Chamberlin H.M. *Caenorhabditis briggsae* methods (December 18, 2006). The C. elegans Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.128.1 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_Cbriggsaemethods/Cbriggsaemethods.pdf (дата обращения 28.03.2023).
6. Brenner S. The genetics of *Caenorhabditis elegans* // Genetics. 1974. Vol. 77. P. 71–94. <https://doi.org/10.1093/genet->

ics/77.1.71.

7. Coles G.C. Drug resistance and drug tolerance in parasites // Trends in parasitology. 2006. Vol. 22. P. 348. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2006.05.013>.

8. Dent J.A. What can *Caenorhabditis elegans* tell us about nematocides and parasites? // Biotechnology and bioprocess engineering. 2001. Vol. 6. P. 252–263. <https://doi.org/10.1007/bf02931986>

9. Ding X., Njus Z., Kong T., Su W., Ho C.-M., Pandey S. Effective drug combination for *Caenorhabditis elegans* nematodes discovered by output-driven feedback system control technique // Science Advances. 2017. Vol. 3. eaao1254. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aao1254>.

10. Fleming J.T., Squire M.D., Barnes T.M., Tornøe C., Matsuda K., Ahnn J., Fire A., Sulston J.E., Baenard E.A., Sattelle D.B., Lewis J.A. *Caenorhabditis elegans* levamisole resistance genes lev-1, unc-29 and unc-38 encode functional nicotinic acetylcholine receptor subunits // Journal of Neuroscience. 1997. Vol. 17. P. 5843–5857. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-15-05843.1997>.

11. Gottschalk A., Almedon R.B., Schedletzky T., Anderson S.D., Yates III J.R., Schafer W.R. Identification and characterization of novel nicotinic receptor associated proteins in *Caenorhabditis elegans* // The EMBO journal. 2005. Vol. 24. P. 2566–2578. <https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7600741>.

12. Gupta B.P., Johnsen R., Chen N. Genomics and biology of the nematode *Caenorhabditis briggsae* (May 3, 2007). The *C. elegans* Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.136.1 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_genomesCbriggsae/genomesCbriggsae.pdf (дата обращения 28.03.2023).

13. Hahnel S.R., Dilks C.M., Heisler I., Andersen E.C., Kulke D. *Caenorhabditis elegans* in anthelmintic research – Old model, new perspectives // International journal for parasitology: drugs and drug resistance. 2020. Vol. 14. P. 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijppdr.2020.09.005>.

14. Harrow I.D., Gratton K.A. Mode of action of the anthelmintics morantel, pyrantel and levamisole in the muscle cell membrane of the nematode *Ascaris suum* // Pesticide science. 1985. Vol. 16. P. 662–672. <https://doi.org/10.1002/ps.2780160612>.

15. Holden-Dye L., Walker R.J. Anthelmintic drugs and nematocides: studies in *Caenorhabditis elegans* (December 16, 2014). The *C. elegans* Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.143.2 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_anthelminticdrugs.2/anthelminticdrugs.2.pdf (дата обращения 28.03.2023).

16. Kalinnikova T.B., Timoshenko A.Kh., Tarasov O.Yu., Gainutdinov T.M., Gainutdinov M.Kh. Thermotolerance of soil nematodes *Caenorhabditis briggsae* AF16 and *Caenorhabditis elegans* N2 under experimental conditions // Russian journal of ecology. 2011. Vol. 42, №5. P. 435–437. <https://doi.org/10.1134/s1067413611050079>.

17. Kalinnikova T.B., Kolsanova R.R., Gainutdinov M.Kh. *Caenorhabditis elegans* as a convenient model organism for understanding heat stress effects upon intact nervous system // Heat stress: causes, treatment and prevention. NY: Nova Science Publishers, 2012. P. 113–140.

18. Kalinnikova T.B., Kolsanova R.R., Belova E.B., Shagidullin R.R., Gainutdinov M.Kh. Opposite responses of the cholinergic nervous system to moderate heat stress and hyperthermia in two soil nematodes // Journal of thermal biology. 2016. Vol. 62. P. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.05.007>.

19. Katiki L.M., Ferreira J.F.S., Zajac A.M., Master C., Lindsay D.S., Chagas A.C.S., Amarante A.F.T. *Caenorhabditis elegans* as a model to screen plant extracts and compounds as natural anthelmintics for veterinary use // Veterinary parasitology.

2011. Vol. 182. P. 264–268. doi/10.1016/j.vetpar.2011.05.020.

20. Lycke R., Parashar A., Pandey S. Microfluidics-enabled method to identify modes of *Caenorhabditis elegans* paralysis in four anthelmintics // Biomicrofluidics. 2013. Vol. 7. P. e064103. <https://doi.org/10.1063/1.4829777>.

21. Shalaby H.A. Anthelmintic resistance; how to overcome it? // Iranian journal of parasitology. 2013. Vol. 8. P. 18–32.

22. Sleight J.N. Functional analysis of nematode nicotinic receptors // Bioscience Horizons. 2010. Vol. 3. P. 29–39. <https://doi.org/10.1093/biohorizons/hzq005>.

23. Weaver K.J., May C.J., Ellis B.L. Using a health-rating system to evaluate the usefulness of *Caenorhabditis elegans* as a model for anthelmintic study // PLoS ONE. 2017. P. 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179376>.

References

1. Egorova A. V., Kalinnikova T. B., Shagidullin R. R. Toxicheskoe deistvie medi, kadmiya i svintsa na svobodnozhivushchikh pochvennykh nematod *Caenorhabditis elegans* i *Caenorhabditis briggsae* [Toxic action of copper, cadmium and lead on organisms of free-living soil nematodes *Caenorhabditis elegans* and *Caenorhabditis briggsae*] // Toksikologicheskii vestnik [Toxicological Review]. 2021. No 1. P. 43–46. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-1-43-46>.

2. Klyaritskaya I.L., Vil'tsanjuk I.A., Grigorenko E.I., Chernukha S.N. Sovremennye predstavleniya o lechenii i diagnostike gelmintozov [Modern conception about treatment and diagnostics of helminthosis] // Krimskij terapevtichnij zhurnal [Crimean therapeutic journal]. 2010. No 2. P. 144–147.

3. Kolsanova R.R., Timoshenko A.Kh., Gainutdinov M.Kh., Kalinnikova T.B. Deistvie levamisola i pirantela na povedenie pochvennykh nematod *Caenorhabditis elegans* i *Caenorhabditis briggsae* [Levamisole and pyrantel action upon behavior of soil nematodes *Caenorhabditis elegans* and *Caenorhabditis briggsae*] // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series]. 2011. Vol. 153, No 2. P. 180–189.

4. Avila D., Helmcke K., Aschner M. The *Caenorhabditis elegans* model as a reliable tool in neurotoxicology // Human & experimental toxicology. 2012. Vol. 31. P. 236–243. doi: 10.1177/0960327110392084.

5. Baird S.E., Chamberlin H.M. *Caenorhabditis briggsae* methods (December 18, 2006). The *C. elegans* Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.128.1 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_Cbriggsaemethods/Cbriggsaemethods.pdf (дата обращения 28.03.2023).

6. Brenner S. The genetics of *Caenorhabditis elegans* // Genetics. 1974. Vol. 77. P. 71–94. <https://doi.org/10.1093/genetics/77.1.71>.

7. Coles G.C. Drug resistance and drug tolerance in parasites // Trends in parasitology. 2006. Vol. 22. P. 348. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2006.05.013>.

8. Dent J.A. What can *Caenorhabditis elegans* tell us about nematocides and parasites? // Biotechnology and bioprocess engineering. 2001. Vol. 6. P. 252–263. <https://doi.org/10.1007/bf02931986>.

9. Ding X., Njus Z., Kong T., Su W., Ho C.-M., Pandey S. Effective drug combination for *Caenorhabditis elegans* nematodes discovered by output-driven feedback system control technique // Science Advances. 2017. Vol. 3. eaao1254. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aao1254>.

10. Fleming J.T., Squire M.D., Barnes T.M., Tornøe C., Matsuda K., Ahnn J., Fire A., Sulston J.E., Baenard E.A., Sattelle D.B., Lewis J.A. *Caenorhabditis elegans* levamisole resistance genes lev-1, unc-29 and unc-38 encode functional nicotinic acetylcholine receptor subunits // Journal of Neuroscience.

1997. Vol. 17. P. 5843–5857. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.17-15-05843.1997>.

11. Gottschalk A., Almedon R.B., Schedletzky T., Anderson S.D., Yates III J.R., Schafer W.R. Identification and characterization of novel nicotinic receptor associated proteins in *Caenorhabditis elegans* // The EMBO journal. 2005. Vol. 24. P. 2566–2578. <https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7600741>.

12. Gupta B.P., Johnsen R., Chen N. Genomics and biology of the nematode *Caenorhabditis briggsae* (May 3, 2007). The *C. elegans* Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.136.1 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_genomesCbriggsae/genomesCbriggsae.pdf (accessed 28.03.2023).

13. Hahnel S.R., Dilks C.M., Heisler I., Andersen E.C., Kulke D. *Caenorhabditis elegans* in anthelmintic research – Old model, new perspectives // International journal for parasitology: drugs and drug resistance. 2020. Vol. 14. P. 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2020.09.005>.

14. Harrow I.D., Gratton K.A. Mode of action of the anthelmintics morantel, pyrantel and levamisole in the muscle cell membrane of the nematode *Ascaris suum* // Pesticide science. 1985. Vol. 16. P. 662–672. <https://doi.org/10.1002/ps.2780160612>.

15. Holden-Dye L., Walker R.J. Anthelmintic drugs and nematicides: studies in *Caenorhabditis elegans* (December 16, 2014). The *C. elegans* Research Community, WormBook. doi/10.1895/wormbook.1.143.2 // URL: http://wormbook.org/chapters/www_anthelminticdrugs.2/anthelminticdrugs.2.pdf (accessed 28.03.2023).

16. Kalinnikova T.B., Timoshenko A.Kh., Tarasov O.Yu., Gainutdinov T.M., Gainutdinov M.Kh. Thermotolerance of soil nematodes *Caenorhabditis briggsae* AF16 and *Caenorhabditis elegans* N2 under experimental conditions // Russian journal of ecology. 2011. Vol. 42, No 5. P. 435–437. <https://doi.org/10.1134/s1067413611050079>.

17. Kalinnikova T.B., Kolsanova R.R., Gainutdinov M.Kh. *Caenorhabditis elegans* as a convenient model organism for understanding heat stress effects upon intact nervous system // Heat stress: causes, treatment and prevention. NY: Nova Science Publishers, 2012. P. 113–140.

18. Kalinnikova T.B., Kolsanova R.R., Belova E.B., Shagidullin R.R., Gainutdinov M.Kh. Opposite responses of the cholinergic nervous system to moderate heat stress and hyperthermia in two soil nematodes // Journal of thermal biology. 2016. Vol. 62. P. 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.05.007>.

19. Katiki L.M., Ferreira J.F.S., Zajac A.M., Master C., Lindsay D.S., Chagas A.C.S., Amarante A.F.T. *Caenorhabditis elegans* as a model to screen plant extracts and compounds as natural anthelmintics for veterinary use // Veterinary parasitology. 2011. Vol. 182. P. 264–268. doi:10.1016/j.vetpar.2011.05.020.

20. Lycke R., Parashar A., Pandey S. Microfluidics-enabled method to identify modes of *Caenorhabditis elegans* paralysis in four anthelmintics // Biomicrofluidics. 2013. Vol. 7. P. e064103. <https://doi.org/10.1063/1.4829777>.

21. Shalaby H.A. Anthelmintic resistance; how to overcome it? // Iranian journal of parasitology. 2013. Vol. 8. P. 18–32.

22. Sleight J.N. Functional analysis of nematode nicotinic

receptors // Bioscience Horizons. 2010. Vol. 3. P. 29–39. <https://doi.org/10.1093/biohorizons/hzq005>.

23. Weaver K.J., May C.J., Ellis B.L. Using a health-rating system to evaluate the usefulness of *Caenorhabditis elegans* as a model for anthelmintic study // PLoS ONE. 2017. P. 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179376>.

Egorova A.V., Gatiyatullina A.F., Kalinnikova T.B. The characteristic of dynamics of pyrantel nematocidal activity.

The dynamics of pyrantel nematocidal activity was investigated in experiments with two soil nematodes, namely *Caenorhabditis elegans* and *Caenorhabditis briggsae*. Pyrantel is agonist of L-subtype nicotinic acetylcholine receptors, which is used to treat different helminthiasis of humans and animals. The characteristics of dynamics of pyrantel toxic action on *C. elegans* and *C. briggsae* organisms were revealed in this work. 60-minutes exposition to pyrantel in concentrations range 62.5–250 µM caused dose-dependent behavior disturbances of *C. elegans*. When exposure time was increased up to 90–180 minutes, some *C. elegans* repaired their coordinated swimming. The prolonged exposition to pyrantel (up to 240–360 minutes) decreased the percentage of *C. elegans* with normal locomotion. *C. briggsae* were more sensitive to negative pyrantel action. The decrease of percentage of nematodes without behavior disturbances was revealed during first 90 minutes of incubation with pyrantel. The prolonged exposition caused slight increase of nematode percentage with coordinated behavior only at pyrantel concentration of 125 µM. At lower pyrantel concentration (62.5 µM) the percentage of nematodes unable to sustain coordinated swimming was at the same level when exposure time increased up to 360 minutes. The repeated pyrantel addition into incubation medium after 60 minutes from experiment beginning led to drastic decrease of percentage of *C. elegans* with normal locomotion. The possibility of quick nematodes adaptation to single intake of pyrantel, revealed in this work, confirms the requirement of close adherence to recommended doses of anthelmintic drugs to protect the development of drug resistance of helminthes.

Keywords: *Caenorhabditis elegans*; *Caenorhabditis briggsae*; anthelmintic drugs; pyrantel.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 18.04.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 04.05.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 11.05.2023

Сведения об авторах

Егорова Анастасия Васильевна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: egorovanastassia@gmail.com.

Гатиятуллина Алсу Фоатовна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: gaf9212@gmail.com.

Калинникова Татьяна Борисовна, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: tbkalinnikova@gmail.com.

Information about the authors

Anastasia V. Egorova, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: egorovanastassia@gmail.com.

Alsu F. Gatiyatullina, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: gaf9212@gmail.com.

Tatiana B. Kalinnikova, Head of the Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: tbkalinnikova@gmail.com.



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

К публикации в «Российском журнале прикладной экологии» принимаются научные статьи, сообщения, рецензии, обзоры по всем разделам экологической науки. В журнале печатаются не публиковавшиеся ранее материалы. В предлагаемых для публикации научных статьях должно содержаться обоснование актуальности, четкая постановка целей и задач исследования, научная аргументация, обобщения и выводы, представляющие интерес своей новизной, научной и практической значимостью.

Для публикации статьи автору (авторам) необходимо представить в редакцию следующие материалы:

- 1) направление от организации (в 1 экз.);
- 2) электронную версию статьи по фамилии первого автора (например, ivanov.doc)
- 3) сведения об авторах: имя, отчество и фамилия, должность, ученая степень и ученое звание, место работы и адрес электронной почты – на русском и английском языках.
- 4) Сканированная копия подписанного Лицензионного договора с каждым автором (форма договора размещена на сайте журнала).

Указанные файлы следует переслать в адрес редакции по электронной почте rjaeco@mail.ru или заполнить непосредственно на сайте журнала www.rjae.ru.

Требования к тексту рукописи:

Статьи публикуются на русском и английском языках.

Объем рукописи не должен превышать 20 страниц, для рецензий и сообщений – до 5 страниц, для обзоров – до 30 страниц.

Текст статьи должен быть набран в формате MS Word 1997-2003, шрифт Times New Roman, кегль 14, через 1.5 интервала. Поля рукописи 20 мм, абзацный отступ 0.5 см. Текст набирается без переносов.

Текст статьи должен быть разбит на разделы. Рекомендуется использовать стандартные рубрики: «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты и их обсуждение», «Выводы» или «Заключение», «Список литературы».

При оформлении статьи следует соблюдать приведенные ниже правила.

- 1-я строка – УДК (выравнивание по левому краю);
- 2-я строка – инициалы и фамилии автора (авторов), место работы, e-mail (курсив, выравнивание по правому краю);
- 3-я строка – название статьи – на русском и английском языках (прописными буквами, полужирный шрифт, выравнивание по центру);
- 4-я строка – аннотация (не менее 200 слов) и ключевые слова (не более 5, отделяются точкой с запятой) – на русском и английском языках (выравнивание по ширине);
- 5-я строка – текст статьи (выравнивание по ширине).

Заголовки таблиц приводятся курсивом на русском и английском языках. Таблицы могут быть книжной

или альбомной ориентации.

Рисунки к статье должны быть сохранены в отдельных файлах с соответствующим расширением (xls, jpg, tiff). Растровые изображения должны иметь разрешение не менее 300 dpi. Все указанные материалы могут быть представлены в цветном или черно-белом вариантах. Подписи к рисункам приводятся курсивом на русском и английском языках; аббревиатуры расшифровываются в подрисуночных подписях. Все обозначения на рисунках выполняются шрифтом Times New Roman.

Математические формулы должны быть набраны в MS Equation. Пояснения значений символов и числовых коэффициентов необходимо давать непосредственно под формулой в последовательности, в которой они приведены в формуле.

Химические формулы следует набирать с помощью специализированных программ (Chem Draw, HyperChem, Isis Draw). Все элементы химической формулы должны быть хорошо различимы.

Все физические величины должны быть даны в системе единиц «СИ».

В десятичных дробных числах целая часть отделяется от дробной точкой.

Латинские названия видов печатаются курсивом.

Ссылки на литературные источники в тексте даются в круглых скобках, например: (Иванов и др., 2019; Методические ..., 2001; Одум, 2007; Тихомиров, Марков, 2009; Ferrand et al., 2012).

Список литературы составляется в алфавитном порядке и нумеруется в ручном режиме (сначала приводятся отечественные источники, затем иностранные).

Транслитерированный список литературы (References) приводится отдельно. Русскоязычные работы указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках приводится их перевод на английский язык. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Обязательным условием является указание в списке литературы DOI (уникальный идентификационный номер цифрового объекта) тех работ, у которых он есть.

Образец оформления списка литературы:

1. ГОСТ Р ИСО 22033-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений.
2. Григорьян Б.Р., Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М., Сахабиев И.А. Оценка соответствия сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан требованиям органического агропроизводства // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №3. С. 40–45.
3. Зиганшин И.И., Зиганшина Д.И. Лекарственные растения островов Казанского района переменного подпора Куйбышевского водохранилища // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов / Материалы докл. VII Всерос. научно-практ. конф. Махачкала: Изд-во ДГПУ, 2019. С. 18–20.
4. Иванчева Е.Ю. Сравнительный анализ видовой структуры рыбного населения малых рек Рязанской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2008. 25 с.

5. Сафонов А.Ф. Системы земледелия. М.: Колос, 2006. 447 с.

6. Спирина Е.В. К вопросу о биологии форели ручьевой *Salmo trutta morpha fario* // Природа Симбирского Поволжья. Ульяновск, 2002. Вып. 3. С. 154–157.

7. Яковлев В.А. Изменение структуры зообентоса северо-восточной Фенноскандии под влиянием природных и антропогенных факторов: Дисс. ... докт. биол. наук. Казань, 1999. 436 с.

8. Hanson M.J., Stefan H.G. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Water Resour. Bull. 1984. V. 20. P. 889–900. DOI 10.1111/j.1752-1688.1984.tb04797.x.

9. WoRMS Editorial Board (2016). World Register of Marine Species // URL: <http://www.marinespecies.org> (дата обращения: 20.05.2016).

Образец оформления транслитерированного списка литературы:

1. GOST R ISO 22033-2009. Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Hronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshih rastenij [Soil quality. Biological methods. Chronic toxicity to higher plants].

2. Grigor'yan B.R., Kol'tsova T.G., Sungatullina L.M., Sakhabiyev I.A. Otsenka sootvetstviya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatij Respubliki Tatarstan trebovaniyam organicheskogo agroproduktstva [Assessment of the conformity of agricultural enterprises of the Republic of Tatarstan with the requirements of organic agricultural production] // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2016. No 3. P. 40–45.

3. Ziganshin I.I., Ziganshina D.I. Lekarstvennye rasteniya ostrovov kazanskogo rajona peremennogo podpora Kujbyshevskogo vodohranilishha [Medicinal plants of the islands of Kazan area of the variable subpropt of the Kuibyshev reservoir] // Bioraznoobrazie i racional'noe ispol'zovanie prirodnih resursov [Biodiversity and natural resource

management] / Materialy dokl. VII Vseros. nauchno-prakt. konf. Mahachkala: DGPU, 2019. P. 18–20.

4. Ivancheva E.Yu. Sravnitel'nyj analiz vidovoj struktury rybnogo naseleniya malyh rek Ryazanskoj oblasti [Comparative analysis of the species structure of the fish population of small rivers in the Ryazan region]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) Borok, 2008. 25 p.

5. Safonov A.F. Sistemy zemledeliya [Farming systems]. M.: Kolos, 2006. 447 p.

6. Spirina E.V. K voprosu o biologii foreli ruch'evoj *Salmo trutta morpha fario* [On the biology of brook trout *Salmo trutta morpha fario*] // Priroda Simbirskogo Povolzh'ya [Nature of the Simbirsk Volga]. Ul'yanovsk, 2002. 3. P. 154–157.

7. Yakovlev V.A. Izmenenie struktury zoobentosa severo-vostochnoj Fennoskandii pod vliyaniem prirodnih i antropogennykh faktorov [Changes in the structure of zoobenthos in northeastern Fennoscandia under the influence of natural and anthropogenic factors]: DSc (Dr. of Chem) thesis. Kazan', 1999. 436 p.

8. Hanson M.J., Stefan H.G. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Water Resour. Bull. 1984. V. 20. P. 889–900. DOI 10.1111/j.1752-1688.1984.tb04797.x.

9. WoRMS Editorial Board (2016). World Register of Marine Species // URL: <http://www.marinespecies.org> (accessed: 20.05.2016).

Принятая к рассмотрению статья направляется рецензенту, при наличии замечаний она отсылается авторам на доработку. Окончательное решение о принятии статьи к публикации принимается редколлегией журнала.

Верстка статьи для окончательной проверки и утверждения высылается авторам по электронной почте.





Российский журнал прикладной экологии
420087 г. Казань, ул. Даурская, 28
www.rjae.ru