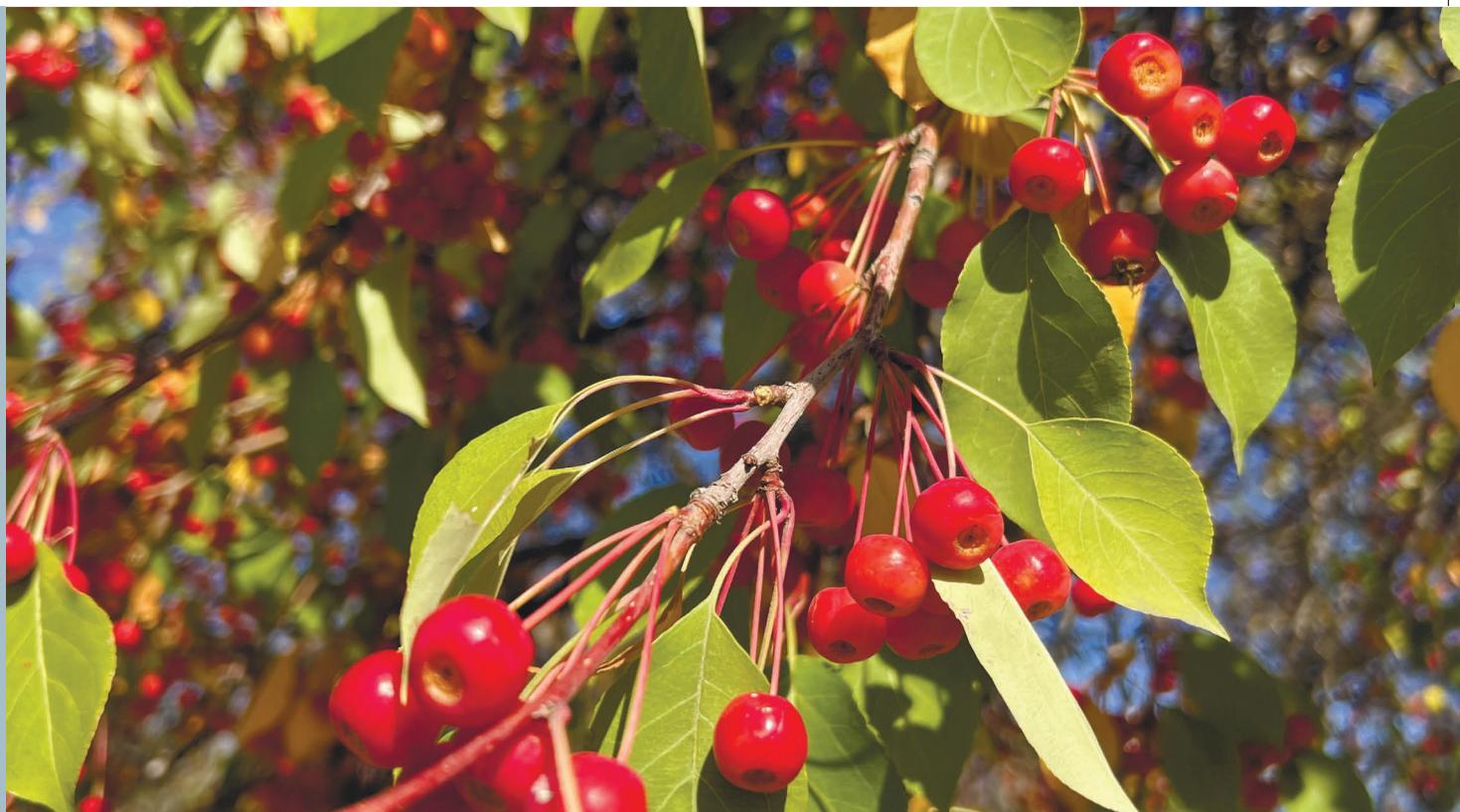


ISSN 2411-7374 (print)
ISSN 2782-6643 (online)



РОССИЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ

4/2023





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

д.г.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. Бородавская
Фото на обложке: Э.Х. Рупова

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. Даувальтер – 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

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

Doctor of Geography, 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: E.H. Rupova

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, Dauruskaya 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. Zakonnov – 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 Geoecology, Lomonosov Moscow State University

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. Rummyantsev – 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); Museum 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

А.Т. Сабиров, Р.Р. Шагидуллин, Р.А. Ульданова
Программа исследования аккумуляции углерода
в лесных экосистемах 4

*Л. Александрова, А.С. Гордеев, В.Р. Бабичук,
П.А. Курынцева, С.Ю. Селивановская*
Оценка запасов углерода в почве на территории
карбонного полигона «Карбон – Поволжье» 12

И.С. Сауткин, А.С. Кутузова
Взаимосвязь функциональных признаков и надземной
биомассы растений травяно-кустарничкового яруса
в экосистеме карбонного полигона 22

П.А. Кузьмин
Физиолого-биохимические особенности
Populus balsamifera l. в условиях антропогенного
стресса 30

Гидроэкология

*В.З. Латыпова, Н.Ю. Степанова, Т.А. Кондратьева,
О.В. Никитин*
Мониторинг поверхностных вод Куйбышевского
водохранилища в районе водного участка полигона
«Карбон – Поволжье» 39

*М.В. Косова, О.Ю. Деревенская, Е.Н. Унковская,
Н.В. Шурмина, Ф.М. Мухаметзянова*
Сезонная и межгодовая динамика характеристик
зоопланктонного сообщества зарастающего
водоема (на примере озера Илантово
Волжско-Камского заповедника) 50

Экология почв

Л.В. Пилип, Н.В. Сырчина
Влияние мелиорантов на подвижность кадмия
в почвах 60

Правила для авторов 67

CONTENTS

Ecology of natural systems

Sabirov A.T., Shagidullin R.R., Uldanova R.A.
Carbon accumulation research program in forest
ecosystems 4

*Alexandrova L., Gordeev A.S., Babichuk V.R.,
Kuryntseva P.A., Selivanovskaya S.Yu.*
The estimation of carbon content in soil on the territory
of the carbon polygon «Carbon – Povolzhye» 12

Sautkin I.S., Kutuzova A.S.
Relationship between functional traits and aboveground
biomass of plants forest floor in the ecosystem of the
carbon polygon. 22

Kuzmin P.A.
Investigation of physiological and biochemical
features of *Populus balsamifera l.* under conditions of
anthropogenic stress 30

Hydroecology

*Latypova V.Z., Stepanova N.Yu., Kondratieva T.A.,
Nikitin O.V.*
Monitoring of Kuibyshev reservoir surface water
in the area of the «Carbon – Povolzhye» polygon
water section 39

*Kosova M.V., Derevenskaya O.Yu., Unkovskaya E.N.,
Shurmina N.V., Mukhametzyanova F.M.*
Seasonal and interannual dynamics of zooplankton
community characteristics of an overgrowing
water body (on the example of Ilantovo lake
of the Volzhko-Kamsky Reserve) 50

Soil ecology

Pilip L.V., Syrchina N.V.
Effect of meliorants on cadmium mobility
in soils 60

Instructions for authors 67

¹А.Т. Сабиров, ¹Р.Р. Шагидуллин, ²Р.А. Ульданова¹Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, tasat@list.ru²Детский эколого-биологический центр, г. Нижнекамск

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЯ АККУМУЛЯЦИИ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Представлена программа исследования аккумуляции атмосферного углерода в лесных экосистемах Республики Татарстан. Описаны направления, методы и этапы проведения научных изысканий при проведении работ по оценке депонирования углерода компонентами лесных биогеоценозов, создании лесных карбоновых стационаров. Выделены составляющие научной продукции при изучении поглощения лесами парниковых газов. Разработаны рекомендации по ведению лесного хозяйства и природопользованию, направленные на повышение углерододепонирующей функции лесных экосистем региона.

Ключевые слова: лесные экосистемы; почва; лесная подстилка; аккумуляция углерода; программа и методы исследования; рекомендации производству.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.04.11>

Введение

Лесные экосистемы обладают высоким потенциалом по связыванию органического вещества и сокращению выбросов парниковых газов. При определении аккумуляции углерода лесными экосистемами выделяют резервуары (пулы) углерода по компонентам: биомасса, мертвая древесина, лесная подстилка, органическое вещество почвы (Методические ..., 2017). Исследуют лесную подстилку, органическое вещество почв, корневую фитомассу, в наземной фитомассе – древостой, подрост, подлесок, травяной покров, мертвую древесину (отпад сухостой, валеж). В условиях климатических изменений и повышения концентрации парниковых газов в атмосфере оценка углеродного эффекта (депонирования углерода) рассматривается в аспекте устойчивого управления лесами.

Лесные экосистемы одновременно выполняют ресурсные (древесные и недревесные), водоохраные, водорегулирующие, почвозащитные, рекреационные функции, защищают склоны от эрозии и оползней, способствуют созданию благоприятного водного режима, являются местом обитания множества видов растений и животных, сохраняют почвенные разновидности и плодородный слой почвы, устойчивость ландшафтов. Устойчивость лесов во многом определяется их продуктивностью и биологическим разнообразием растений.

Леса Республики Татарстан представлены лиственными и хвойными фитоценозами различного состава и возраста, функционируют в различ-

ных почвенно-экологических условиях. В физико-географическом отношении Татарстан расположен в лесной и лесостепной зонах, что подразумевает необходимость разработки различных технологий воспроизводства лесов. Информация о лесоводственно-таксационных показателях лесных насаждений, определенные инструментальными методами, является основой для решения производственных задач.

Цель исследований – разработка алгоритма оценки аккумуляции углерода компонентами существующих и проектируемых эксплуатационных, защитных лесов, особо охраняемых природных территорий, выделения лесных экосистем с высокими значениями депонирования углерода, управление их углерододепонирующей функцией с учётом почвенных условий местности.

Направления исследований

Программа научных работ по оценке депонирования углерода существующими и проектируемыми лесами, созданию карбоновых стационаров в лесах Республики Татарстан включает следующие направления.

1. Актуализация цифровой лесной карты, периодическое обновление данных по лесоустроительным материалам лесничеств.

2. Формирование базы данных лесоводственно-таксационных показателей насаждений по природным районам и лесничествам с использованием геоинформационных систем.

3. Разработка структуры эталонных лесов региона по природным районам, элементам ре-

льефа, условиям увлажнения, с богатым флористическим составом, отвечающим углерододепонирующим, хозяйственным, водоохраным и почвозащитным целям, организация карбоновых стационаров. Создание технологий воспроизводства и формирования лесных насаждений с учётом типа лесорастительных условий, создание моделей продуктивных лесов основных лесобразующих пород.

Благодаря лесным карбоновым стационарам в лесной и лесостепной зонах становится возможным учет углерода, депонированного лесными формациями. Это позволяет установить поправочные территориальные коэффициенты для расчетов углеродного баланса в экосистемах. На карбоновых стационарах проводятся мониторинговые наблюдения за аккумуляцией атмосферного углерода в компонентах лесных биогеоценозов в современных условиях изменения климата. Изучается углеродный баланс в основных типах лесных экосистем Республики Татарстан, способность различных видов древесных и кустарниковых растений по связыванию углерода при различном возрастном цикле, за определенные интервалы времени (10, 20, ... 50 лет). Биогеоценологические изыскания по природным районам позволяют определить достоверные показатели эмиссии и поглощения парниковых газов в пространственном аспекте. На основе периодических исследований в конкретных биогеоценозах выявляются коррелятивные связи наземных и аэрокосмических данных расчета углеродного баланса территорий.

4. Оценка пространственно-временной изменчивости эмиссии и поглощения парниковых газов лесными насаждениями на основе цифровизации динамических, сукцессионных процессов.

5. Создание интерактивной карты антропогенно-нарушенных, эродированных лесных земель с оценкой состояния почв и растительности.

6. Цифровое почвенное картирование лесных территорий с систематизацией и созданием базы данных свойств почв.

7. Разработка научных основ сохранения биологического разнообразия и повышения продуктивности, углерододепонирующей роли эксплуатационных и защитных лесных насаждений по природным районам.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – лесные экосистемы лесного фонда Республики Татарстан, защитные лесные насаждения, водоохраные леса и зеленые насаждения населенных пунктов в разрезе физико-географических районов республики:

Предкамья, Восточного и Западного Закамья, Предволжья. Рассматриваются лесные биогеоценозы естественного и искусственного происхождения, характеризующиеся однородностью лесорастительных условий и одинаковым составом основных компонентов фитоценоза. Исследуются еловые, пихтовые, сосновые, лиственничные, дубовые, березовые, осиновые, липовые, кленовые, биогеоценозы с высокими значениями депонированного углерода.

В рамках разработки мероприятий по уменьшению эмиссии и повышению поглощения парниковых газов лесными экосистемами в РФ проводятся биогеоценологические исследования растительности и почв лесных экосистем с использованием данных наземного обследования территорий, космических снимков, геоинформационных систем и методов математического моделирования. Изучаются природные явления и результаты техногенной деятельности человека, оказывающие воздействие на формирование растительности и почв, углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем.

В нижних ярусах фитоценоза изучают подрост и подлесок путем закладки учётных площадок размером 10 м². Подрост подразделяют на группы высот (мелкий – до 0.5 м, средний – 0.6–1.5 м, крупный – более 1.5 м) и категории состояния (благонадежный, сомнительный, неблагонадежный, сухой). Видовой состав сосудистых растений с оценкой обилия, степень покрытия поверхности почвы описывают по шкале Друде и количественно устанавливают видовое богатство и видовую насыщенность растений.

Описание рельефа местности, обследование почвенного покрова в полевых условиях, лабораторные анализы образцов почв и подстилок проводятся по общепринятым методикам. Закладывают полные почвенные разрезы, запасы подстилок определяют методом шаблонов с учетом парцеллярной структуры древостоев (Карпачевский, 1977) и разделением на типы (муль, модер или мор). Исследуют морфологические, физические, физико-химические и биохимические свойства почв. При обработке экспериментальных данных используют методы математической статистики, корреляционный анализ между почвенными показателями и продуктивностью древостоев.

Этапы исследования

Подготовительный этап. Систематизируются литературные, картографические, лесоустроительные материалы по состоянию растительного и почвенного покрова эксплуатационных и защитных лесов; изучаются современные тенденции

Таблица. Эталонные лесные экосистемы Республики Татарстан
Table. Reference forest ecosystems of the Republic of Tatarstan

Лесные экосистемы Forest ecosystems	Состав/возраст (лет) древостоя Composition/ age (years) of the forest stand	$\frac{H_{cp}}{M}$, м / $\frac{H_{cp}}{M}$, m M, м ³ /га/ M, m ³ /ha *	Тип подстилки Floor type	Почва Soil	Мощность почвы, см** Soil thickness, cm*
Хвойные					
Ельник липово-пролесниковый	10Е+Лп 65	23.8 302.6	Муль-модер	Серая лесная среднесуглинистая	15 8
Ельник липово-пролесниковый	10Е 66	25.5 277.6	Модер	Серая лесная среднесуглинистая	14 7
Ельник липово-пролесниковый	6Е4П+С 58	24.1 315.4	Муль-модер	Темно-серая лесная среднесуглинистая	27 9
Ельник липово-разнотравный	4Е1ПЗБ2Лп 70	24.2 450.0	Модер	Серая лесная среднесуглинистая	9 11
Ельник липово-снытьевый	8Е2Лп+Б 49	24.5 450.6	Муль-модер	Светло-серая лесная среднесуглинистая	7 13
Пихтарник липово-снытьевый	10П+Е 68	23.3 349.8	Муль-модер	Серая лесная среднесуглинистая	9 18
Сосняк липово-разнотравный	10С 47	19.0 328.8	Модер	Темно-серая лесная среднесуглинистая	37 20
Сосняк липово-разнотравный	10С 53	25.2 296.1	Модер	Темно-серая лесная среднесуглинистая	15 14
Сосняк липово-разнотравный	10С+Е 55	25.8 327.0	Модер	Бурая лесная связно- песчаная	14 25
Сосняк рябиново-разнотравный	10С 60	24.3 398.1	Модер	Коричнево-бурая лесная тяжелосуглинистая	18 14
Сосняк кленово-разнотравный	10С+Б 80	25.6 440.2	Модер	Коричнево-бурая лесная тяжелосуглинистая	19 16
Сосняк рябиново-разнотравный	10С+Б 55	22.8 359.9	Модер	Серая лесная тяжелосуглинистая	22 11
Лиственничник рябиново-чистотеловый	10Л 48	21.5 240.9	Муль-модер	Коричнево-бурая лесная тяжелосуглинистая	17 16
Лиственничник рябиново-разнотравный	7Л3С 53	22.7 407.0	Муль-модер	Коричнево-бурая лесная среднесуглинистая	14 13
Лиственничник рябиново-разнотравный	9Л1С 54	23.0 426.5	Муль-модер	Коричнево-бурая лесная среднесуглинистая	20 15
Лиственные					
Дубняк кленово-разнотравный	7Д3Лп+Ос.В 85	23.6 303.8	Муль	Светло-серая лесная среднесуглинистая	13 12
Дубняк лещиново-разнотравный	6Д4Лп+Ос 76	24.5 328.5	Муль	Рендзина типичная тяжелосуглинистая	31 24
Дубняк кленово-разнотравный	8Д2Лп+Кл 61	21.5 265.6	Муль	Рендзина выщелоченная тяжелосуглинистая	24 14
Дубняк кленово-снытьевый	8Д2В 65	18.2 318.5	Муль	Коричнево-бурая лесная тяжелосуглинистая	23 15
Липняк кленово-разнотравный	10Лп+Д 80	26.1 376.0	Муль	Серая лесная тяжелосуглинистая	16 13
Липняк кленово-разнотравный	10Лп+Д 90	27.3 428.1	Муль	Светло-серая лесная среднесуглинистая	11 12
Липняк кленово-разнотравный	8Лп2Д+Кл 55	19.7 211.6	Муль	Рендзина типичная тяжелосуглинистая	33 18
Липняк лещиново-снытьевый	7Лп3Кл 64	24.4 304.3	Муль	Серая лесная среднесуглинистая	17 10
Березняк кленово-разнотравный	10Б 45	21.1 275.3	Муль	Коричнево-темно-бурая лесная тяжелосуглинистая	31 16
Березняк кленово-разнотравный	10Б+В 60	24.8 328.5	Муль-модер	Коричнево-темно-бурая лесная тяжелосуглинистая	26 19
Березняк кленово-злаковый	10Б 44	20.1 189.2	Муль	Рендзина типичная тяжелосуглинистая	32 33
Березняк разнотравный	10Б 45	20.7 228.3	Муль	Коричнево-бурая лесная тяжелосуглинистая	25 21
Березняк липово-разнотравный	10Б 40	26.2 464.7	Муль	Чернозём выщелоченный среднесуглинистый	39 11
Кленовник разнотравный	9Кл1Лп+Д 46	16.5 142.1	Муль-модер	Темно-серая лесная тяжелосуглинистая	21 18

* Н_{ср} – средняя высота преобладающей породы; М – общий запас сырастающего древостоя; ** – для горизонтов А1 и АВ (А1А2, АС)

* Н_{ср} – average height of dominant breed; M – total stock of damp-growing forest stand; ** – for horizons A1 and AB (A1A2, AC)

создания лесных культур, лесомелиоративных, водоохранных лесов, аэрокосмические снимки, структура естественных и искусственных лесов по лесоустроительным материалам, технологии проведения лесокультурных работ, рубок ухода в лесных насаждениях; оцениваются площади и завершенность системы защитных и водоохранных лесов, общая лесистость, облесенность пашни, прибрежных территорий рек и озер по космическим снимкам.

Полевой этап. Проводятся лесоводственные, таксационные, геоботанические исследования в эксплуатационных, защитных, водоохранных лесах Волги, Камы и малых рек, включая особо охраняемые природные территории; устанавливаются объемы мертвой древесины по типам леса и группам возраста; определяется структура, типология, лесоводственно-таксационные показатели, санитарное состояние, зараженность болезнями и энтомофагами лесных насаждений, оценивается биологическое разнообразие; выделяются эталонные лесные биогеоценозы для закладки пробных площадей (табл.); выполняется картографирование почв, определяется тип лесорастительных условий, степень развития эрозионных, оползневых процессов, выделяются участки для лесовосстановления, лесоразведения, проведения почвозащитных мелиоративных работ.

Камеральный этап. Вычисляются таксационные показатели, фитомасса сырораствующего древостоя и мертвой древесины; оценивается биологическое разнообразие экосистем, их зараженность болезнями и вредителями, санитарное состояние лесов, выполнение ими целевого назначения; определяются запасы углерода в компонентах фитоценоза и почвах; разрабатываются цифровые почвенные карты по лесничествам; разрабатываются модели продуктивности лесных земель.

Рекомендации лесному хозяйству и природопользованию

При комплексном изучении лесных экосистем научной продукцией являются:

1. Рекомендации по повышению биологического разнообразия, устойчивости и продуктивности лесных насаждений государственного лесного фонда. С целью оптимизации состояния природных ландшафтов, повышения пула углерода в лесных биогеоценозах перспективно увеличение лесистости до 25% от общей площади земель (при существующем 17.5%). Сохранение разнообразия и увеличение площади водоохранных лесных насаждений по берегам рек, защитных лесов на эрозионных землях позволит повысить лесистость ландшафтов региона.

2. Рекомендации по увеличению площади за-

щитных лесов на эродированных землях до оптимального значения показателя облесенности пашни (5-7%), прибрежных территориях, снижению эрозионных, оползневых процессов, увеличению разнообразия и устойчивости лесомелиоративных насаждений. Функционирование системы защитных лесов на эрозионно-опасных участках обеспечит экологический каркас в природных ландшафтах, повысит поглощение парниковых газов лесными биогеоценозами.

Исследования состояния водоохранных зон рек наземными и дистанционными методами свидетельствуют о незавершенности региональной системы защитных лесов. В лесомелиоративных мероприятиях нуждается от 25 до 62% прибрежных территорий Волги и Камы, от 14 до 25% прибрежной территории р. Свияга, более 35-45% береговых зон малых рек Республики Татарстан.

3. Региональные конверсионные коэффициенты ($t C m^{-3}$) для расчета запаса углерода в мертвой древесине по объемному запасу древесины лесного насаждения; средние значения запаса углерода подстилки ($t C га^{-1}$) по типам леса и группам возраста преобладающих древесных пород; средние послойные (0-20, 0-30, 0-50, 0-100 см) запасы углерода в основных типах почв ($t C га^{-1}$); средние значения запасов углерода в почвах ($t C га^{-1}$) для не покрытых лесом земель по природным районам; средние величины запасов углерода в различных пулах защитных лесных насаждений по видам и группам возраста. Корректировка системы расчетов и оценки объемов поглощения и эмиссии парниковых газов лесными экосистемами региона.

4. Показатели оценки депонирования углерода существующими и проектируемыми лесами водораздельных территорий по природным районам и лесничествам, с дифференциацией по породному составу и возрастной структуре, ежегодной абсорбции углерода лесными насаждениями. Запас углерода ($t C/га$) вычисляется для лесных насаждений по породам и возрастным группам: молодняки I и II класса возраста, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные. Устанавливаются показатели накопления органического углерода в основных типах лесных биогеоценозов, в пулах лесных экосистем.

5. Количественная оценка объемов поглощения парниковых газов существующими и проектируемыми защитными лесами на эродированных землях по природным районам и видам (склоновые, приовражные, прибалочные, овражно-балочные, полезщитные, придорожные, водоохранные).

6. Количественная оценка секвестрационного потенциала существующими и проектируемыми

водоохранными лесами в береговой зоне рек Волги, Камы и малых рек в пределах Республики Татарстан, объемов поглощения парниковых газов зелеными насаждениями населенных пунктов.

7. Количественная оценка депонирования углерода лесными экосистемами в нефтедобывающих районах Закамья. Производство добычи нефти сопровождается деградацией компонентов природных систем, потерей лесных фитоценозов и плодородного слоя почв с гумусовыми веществами, ростом эмиссии парниковых газов. Разработка современных технологий воспроизводства углерододепонирующих лесов на территориях нефтедобычи, биологическая рекультивации деградированных, не покрытых лесом земель (начальная стадия лесоразведения) позволяет восстановить плодородие почв, аккумулировать атмосферный углерод.

8. Показатели аккумуляции углерода в основных типах лесных почв, биогеогоризонте A_0 лесов по возрастным группам преобладающих пород, землями не покрытых лесом (проектируемых участков) региона.

Сравнительная оценка запасов углерода подстилки ($t\ C\ га^{-1}$) лесных насаждений преобладающих древесных пород зоны южной тайги и более южных климатических зон в пределах Среднего Поволжья показывает, что различия средних значений запасов углерода подстилки лесных экосистем между лабораторными данными и справочными показателями (Методические ..., 2017) достигает до 25-29%, а в сосновых и еловых биогеоценозах могут достигать 100% и более. Запасы углерода в почвах определяются с учетом площадей, занимаемых лесными насаждениями основных лесобразующих пород по группам возраста (Методические ..., 2017). При этом не учитывается характер структуры почвенного покрова лесов конкретного лесничества, что приводит к значительным потерям в оценках запасов почвенного углерода. Для достоверной оценки углеродного потенциала необходимо использовать данные почвенного картирования, по границам выделов, с учётом сопряженности почв и лесной растительности.

9. Цифровая почвенная карта лесов Республики Татарстан, базы данных разновидностей и показателей почв, лесорастительная и кадастровая оценка лесных земель. Оценка плодородия лесных почв как основы сохранения биологического разнообразия и воспроизводства продуктивных лесов (Газизуллин, Сабиров, 1997, Ульданова, Сабиров, 2020).

10. Система мониторинга изменения суммарного объема поглощения парниковых газов

и накопления углерода лесами, формирование интерактивных карт по углеродному эффекту в результате выполнения проектов по лесовосстановлению и лесоразведению с применением ГИС-технологий. Корректировка системы расчетов и оценки объемов поглощения и эмиссии парниковых газов лесными биогеоценозами региона, определяется углеродный баланс лесов (Замолодчиков, 2011, Замолодчиков, Коровин, Гитарский, 2007; Курбанов, 2002).

Разрабатываются практические рекомендации лесному хозяйству по повышению углерододепонирующей функции лесных экосистем региона.

1. С целью обеспечения лесокультурного производства качественными семенами проводится инвентаризация лесосеменной базы основных лесобразующих пород Республики Татарстан: плюсовых насаждений, лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков.

2. Для сохранения биологического разнообразия растений и почв, повышения ресурсного потенциала существующих лесов водораздельных территорий, защитных лесов в водоохраных зонах рек и озер следует своевременно и качественно выполнить лесоводственные работы с современными машинами и технологиями по уходу. Последовательная замена перестойных насаждений молодым поколением, развитие жизнеспособного подростка и подлеска повышает защитные свойства фитоценозов. Прибрежные растительные сообщества малых рек часто представлены зарослями клена ясенелистного, ивы, которые, целесообразно, с учетом условий местопроизрастания, заменить насаждениями основных лесобразующих пород региона (Ульданова, Сабиров, 2016).

Возрастающая техногенная и рекреационная нагрузки оказывают негативное влияние на растительные и земельные ресурсы. Вследствие вытаптывания, механического повреждения происходит деградация почвенного и растительного покровов, уничтожение плодородного слоя, снижение биологического разнообразия. Повышение лесистости региона и пула углерода в лесных биогеоценозах перспективно путем увеличения площади водоохраных лесных насаждений по берегам рек, водорегулирующих фитоценозов на склоновых землях.

Защитные функции лесных насаждений во многом определяются их продуктивностью. На правобережье р. Волга высокой продуктивностью обладают лесные культуры сосны и лиственницы (древостои Ia-I класса бонитета), липовые и березовые фитоценозы (I-II класс бонитета), изредка встречаются березняки Ia класса. Относительно меньшая производительность присуща дубня-

кам и кленовникам: доминируют древостои II и III классов бонитета. Экстремальные погодные условия, возрастающая антропогенная нагрузка на лесные экосистемы часто отражаются на снижении производительности древостоев. В лесных культурах дуба черешчатого и березы повислой количество здоровых деревьев местами снизилось до 52–64%. Испытывают угнетение еловые и сосновые фитоценозы Предкамья. Своевременно проведенные рубки ухода, лесозащитные мероприятия улучшают санитарное состояние древостоев. Создание лесных культур на основе достижений селекции и биотехнологий, применения интродуцентов с учетом условий местопрорастания способствует формированию здоровых лесных сообществ.

3. Формирование высокопроизводительных лесных насаждений при выращивании в благоприятных условиях, эффективном использовании почвенного плодородия. Ведение лесного хозяйства осуществляется на почвенно-типологической основе, с оптимизацией породного состава насаждений региона в зависимости от лесорастительных условий их произрастания. Устанавливается схема почвенно-типологических групп на основании анализа почвенно-грунтовых условий, состава индикаторной растительности, особенностей рельефа и характера почвообразующих пород. По результатам обследования составляется карта почвенно-типологических групп масштаба 1:25000, где для каждой группы определена целевая порода.

С лесоводственных позиций необходимо: в Предволжье – восстановление коренных широколиственных лесов с участием дуба черешчатого, липы мелколистной, клена остролистного; в Предкамье – формирование хвойных формаций из ели европейской, пихты сибирской, сосны обыкновенной, лиственницы сибирской; в Закамье, с низкой лесистостью прибрежных территорий (местами до 12–15%), следует выращивать смешанные лесные насаждения из хвойных и лиственных пород. Успешное проведение лесовосстановительных работ, защита лесных культур от вредителей и болезней обеспечивается использованием в производстве новой техники и технологий, химических средств. В лесничествах следует развивать питомники с широким ассортиментом древесных и кустарниковых пород, на основе лесосеменного районирования растений. Современные технологии создания лесных культур, формирования устойчивых фитоценозов на основе результатов опытно-производственных объектов и с учётом почвенных факторов местности, реконструкции имеющихся лесов увеличивают

депонирование органических соединений.

5. Создание проектов и технологий формирования устойчивых защитных лесов (лесоразведение) на эродированных, склоновых землях, овражно-балочных системах, по берегам малых рек, увеличение площади защитных лесов. Перспективна оптимизация защитного лесоразведения крупномерными саженцами, воспроизводство устойчивых лесомелиоративных насаждений на нарушенных почвах. Создаются лесомелиоративные насаждения путем посадки деревьев хвойных и лиственных пород, посева желудей дуба черешчатого (Родин, Родин, Рысин, 2002; Сабиров и др., 2009).

6. Разработка проектов мелиоративных работ по защите почвенного покрова от эрозии, снижению эродированности земель для формирования благоприятной гидрологической ситуации на водосборной территории рек. Высокой потенциальной эрозионной опасностью, определяемой площадью земель с крутизной склонов $>3^\circ$, характеризуются до 71–92% прибрежной территории р. Волги, до 15–22% – р. Свияга.

Повышение лесистости региона и пула углерода в лесных биогеоценозах перспективно путем увеличения площади водоохранных лесных насаждений по берегам рек Волги, Камы и малых рек в пределах Республики Татарстан. Разрабатываются проекты и технологии формирования продуктивных водоохранных лесов с высокими значениями депонирования углерода в береговой зоне рек (на покрытых и непокрытых лесом территориях) с учётом почвенных условий местности. Воспроизводство водоохранных лесов с древостоями высокого класса бонитета, развитым кустарниковым ярусом повысит поглощение парниковых газов прибрежными экосистемами, позволит рационально использовать эродированные земли.

8. Стабильное функционирование водоохранных лесов сохраняет плодородие почв и уникальные почвенные разновидности, способствует рациональному использованию плодородия почв. Почвы с различным комплексом лесорастительных свойств в лесной и лесостепной зонах являются основой воспроизводства производительных лесов, сохранения разнообразия растительных сообществ и животного мира. Лесная подстилка и насыщенные гумусовыми веществами почвы становятся пулом аккумуляции углерода прибрежных территорий.

9. Схемы проведения лесопосадочных работ на эродированных землях по зонам деятельности лесничеств и природным районам для повышения поглощения парниковых газов лес-

ными, лесоомелиоративными насаждениями для формирования благоприятной экологической ситуации.

Список литературы

1. Верхунов П.М., Черных В.Л. Таксация леса. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2007. 396 с.
2. Газизуллин А.Х., Сабиров А.Т. Буроземообразование и псевдоподзоливание в почвах лесов Среднего Поволжья и Предуралья. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1997. 204 с.
3. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2022 году. Казань, 2023. 396 с.
4. Замолодчиков Д.Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование 2011. №4. С. 15–22.
5. Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. №6. С. 23–34.
6. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
7. Курбанов Э.А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 298 с.
8. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 №20-р.
9. Родин А.Р., Родин С.А., Рысин С.Л. Лесомелиорация ландшафтов. М.: МГУЛ, 2002. 126 с.
10. Сабиров, А.Т., Галиуллин И.Р., Хузиев Р.Ф., Глушко, С.Г. Рекомендации по созданию защитных лесных насаждений в агроландшафтах Предкамья Республики Татарстан. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2009. 38 с.
11. Ульданова Р.А., Сабиров А.Т. Почвенно-экологические условия произрастания лесной растительности правобережья реки Волги // Российский журнал прикладной экологии. 2020. №4. С. 26–35. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10031.
12. Ульданова Р.А., Сабиров А.Т. Роль прибрежных лесных экосистем Предволжья в сохранении разнообразия растений и почв // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, №2. С. 520–524.

References

1. Verhunov P.M., Chernyh V.L. Taksatsiya lesa [Forest taxation]. Yoshkar-Ola: Marijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2007. 396 p.
2. Gazizullin A.H., Sabirov A.T. Burozemoobrazovanie i psevdopodzolivanie v pochvah lesov Srednego Povolzh'ya i Predural'ya [Brown soil formation and pseudopodzolization in forest soils of the Middle Volga and Cis-Ural regions]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 1997. 204 p.
3. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnyh resursov i ob ohrane okruzhayushchej sredy Respubliki Tatarstan v 2022 godu [State report on the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2022]. Kazan', 2023. 396 p.
4. Zamolodchikov D.G. Sistemy ocenki i prognoza zapasov ugleroda v lesnyh ekosistemah [Systems for assessing and forecasting carbon stocks in forest ecosystems] // Ustojchivoe lesopol'zovanie [Sustainable forest management]. 2011. No 4. P. 15–22.

5. Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Ginarskij M.L. Byudzhet ugleroda upravlyaemyh lesov Rossijskoj Federacii [Variety of soil cover in forest biogeocenosis] // Lesovedenie [Forestry]. 2007. No 6. P. 23–34.

6. Karpachevskij L.O. Pestrota pochvennogo pokrova v lesnom biogeocenoze [Variety of soil cover in forest biogeocenosis]. Moscow: Moscow state university, 1977. 312 p.

7. Kurbanov E.A. Byudzhet ugleroda sosnovykh ekosistem Volgo-Vyatskogo rajonaost [Carbon budget of pine ecosystems in the Volga-Vyatka region]. Yoshkar-Ola, 2002. 300 p.

8. Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu ob"ema pogloshcheniya parnikovyh gazov [Guidelines for quantifying the volume of greenhouse gas absorption]. Order of the Russian Ministry of Natural Resources dated 30.06.2017 №20-r.

9. Rodin A.R., Rodin S.A., Rysin S.L. Lesomelioraciya landshaftov [Forest reclamation of landscapes]. Moscow, 2002. 126 p.

10. Sabirov, A.T., Galiullin I.R., Huziev R.F., Glushko, S.G. Rekomendacii po sozdaniyu zashchitnyh lesnyh nasazhdenij v agrolandshaftah Predkam'ya Respubliki Tatarstan [Recommendations for the creation of protective forest plantations in agricultural landscapes of the Predkamie region of the Republic of Tatarstan]. Kazan': Kazan GAU, 2009. 38 p.

11. Ul'danova R.A., Sabirov A.T. Pochvenno-ekologicheskie usloviya proizrastaniya lesnoj rastitel'nosti pravoberezh'ya reki Volgi [Soil and ecological conditions for the growth of forest vegetation on the right bank of the Volga River] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2020. No 4. P. 26–35. doi: 10.24411/2411-7374-2020-10031.

12. Ul'danova R.A., Sabirov A.T. Rol' pribrezhnyh lesnyh ekosistem Predvolzh'ya v sohranении raznoobraziya rastenij i pochv [The role of coastal forest ecosystems of the Volga region in preserving the diversity of plants and soils] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2016. Vol. 18, No 2. P. 520–524.

Sabirov A.T., Shagidullin R.R., Uldanova R.A. Carbon accumulation research program in forest ecosystems.

The program for studying the accumulation of atmospheric carbon in forest ecosystems of the Republic of Tatarstan is presented. The directions, methods and stages of scientific research when carrying out work to assess carbon sequestration by components of forest biogeocenoses and the creation of forest carbon stations were described. The components of scientific production when studying the absorption of greenhouse gases by forests were identified. Recommendations for forestry and environmental management have been developed, aimed to increasing the carbon sequestration function of forest ecosystems in the region.

Keywords: forest ecosystems; soil; forest floor; carbon accumulation; research program and methods; recommendations for production.

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: 15.09.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 02.10.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 25.10.2023

Сведения об авторах

Сабиров Айрат Тагирзянович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: tasat@list.ru.

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

Ульданова Раиля Анасовна, кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора, Детский эколого-биологический центр Нижнекамского муниципального района Республики Татарстан, 423570, Россия, г. Нижнекамск, пр. Шинников, 59, E-mail: railya.uldanova@mail.ru.

Information about the authors

Airat T. Sabirov, D.Sc. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daurская st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: tasat@list.ru.

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

Railya A. Uldanova, Ph.D. in Agriculture, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 56, Shinnikov av., Nizhnekamsk, 423570, Russia, E-mail: railya.uldanova@mail.ru.



Л. Александрова, А.С. Гордеев, В.Р. Бабичук, П.А. Курынцева, С.Ю. Селивановская
Казанский (Приволжский) федеральный университет, polinazwerewa@yandex.ru

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ НА ТЕРРИТОРИИ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «КАРБОН – ПОВОЛЖЬЕ»

Для разработки технологий снижения эмиссии парниковых газов необходимо иметь представление о накоплении углерода в разных пулах, в частности в почве. В работе проведена оценка содержания общего и микробного углерода, численности бактерий и микромицет в почвах на территории карбонového полигона «Карбон – Поволжье» (Республика Татарстан). Полигон располагается на дерново-подзолистых почвах в подзоне южной тайги с типичным распределением горизонтов. Установлено, что с глубиной содержание общего углерода снижается на 87-93%, микробного углерода на 43-51%, содержание бактерий снижается на 99%, микромицет на 99%. Рассчитанный запас общего углерода составляет 48.05 ± 13.86 т/га, микробного углерода – 4.89 ± 1.13 т/га.

Ключевые слова: карбонový полигон; дерново-подзолистые почвы; запас углерода в почвах; общий углерод; микробный углерод; Республика Татарстан.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.12.21>

Введение

Являясь основной частью наземных экосистем и крупнейшим резервуаром углерода, лесные экосистемы играют важную роль в глобальном изменении климата и окружающей среды. Экологическое равновесие лесных экосистем напрямую связано с круговоротом углерода. Его течение, в частности, обусловлено процессами фотосинтеза и минерализации органических веществ. Основными пулами углерода в лесных экосистемах являются фитомасса, мертвая древесина, подстилка и органическое вещество почвы (Бакаева, Замолотчиков, 2009). Почва является ключевым компонентом глобального цикла углерода, в ней содержится 80% органического углерода биосферы. Так, по данным Батджеса (Batjes, 1996), почвенный покров Земли содержит около 1500 Pg (1 Pg = 10¹⁵ г) органического углерода, это в три раза больше, чем содержится в растительном покрове, и в два раза больше, чем в атмосфере. По данным другой группы исследователей (Chappell et al., 2015) органического углерода в почве содержится в три раза больше, чем в атмосфере. Измерение содержания углерода в разных формах и на различных почвенных горизонтах дает возможность более подробно изучить процессы, обеспечивающие круговорот углерода в биосфере. Известно, что наличие достаточного количества углерода в почве обуславливает ее плодородие. При этом почвенный углерод представлен органической и неорганической формами (Чимитдоржиева, 2017). Углерод служит источ-

ником питания для почвенной биомассы, которая обеспечивает образование и накопление в почве гумуса и микроэлементов (меди, цинка, бора, марганца, молибдена, кобальта), составляющих с гуминовыми веществами комплексы, легко усваиваемые растениями (Ларионов, 2019). При недостатке углерода происходит снижение микробной активности и ослабление рециклирующей активности азота (Прянишникова и др., 2015).

Содержание углерода в почве напрямую связано с деятельностью микроорганизмов, которые составляют более 95% почвенной биомассы и играют фундаментальную роль в качестве первичных продуцентов и редуцентов в круговороте и секвестрации углерода в почве (Mason et al., 2015; Wang et al., 2023). Большинство почвенных микроорганизмов являются гетеротрофами, которые используют органическое вещество в качестве энергии для роста и размножения (Liao et al., 2023). При этом почвенные микроорганизмы расходуют энергию как на конструктивные, так и на деструктивные процессы. За счет гетеротрофной деструкции органического вещества может происходить эмиссия CO₂ в количествах, часто превышающих антропогенные поступления (Сорокин, Александров, 2013). При этом известно, что почвенная микробиота распределена неравномерно по глубине почвенных горизонтов, максимальная численность и разнообразие почвенной микробиоты отмечается в верхнем 0-10 см слое почвы. Ее типичными представителями являются бактерии родов *Acidobacteria*, *Actinobacteria*,

Bacteroidetes, *Proteobacteria*, *Verrucomicrobia* и микромицеты родов *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, *Rozellomycota*, *Unassigned* (Xu et al., 2023). Кроме того, почвенная микробиота представляет собой еще одну из форм накопления углерода в почве. Для формирования заключения о распределении углерода в разных слоях почвы важно оценивать различные пулы.

С февраля 2021 года в Российской Федерации в рамках реализации национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата осуществляется программа по созданию карбоновых полигонов. Она включает в себя исследования, направленные на оценку интегральных значений углеродного баланса для разных типов экосистем, что в дальнейшем позволит рассчитать углеродный след для отдельных субъектов Российской Федерации и страны в целом (Карбоновые полигоны РФ).

Целью данной работы было оценить запасы углерода в почве на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье».

Материалы и методы исследования

Пробы для исследования были отобраны на лесном участке «Обсерватория» полигона «Карбон – Поволжье», который расположен в Зелено-

дольском районе Республики Татарстан. Координаты: 55.843215, 48.798640 (рис. 1).

Растительность полигона типична для Приказанского региона и представляет собой различные сукцессионные стадии коренных хвойно-широколиственных подтаежных и неморальных широколиственных лесов. Основная часть фитоценозов – липняки волосистоосоковые (70%), включающие в себя различные вариации обилия других пород, в числе которых ель финская, сосна обыкновенная, дуб черешчатый, береза повислая, осина дрожащая. Около 15% территории полигона занимают березняки неморальнотравяные с липой. Кроме того, на участке встречаются еловые подтаежные леса с большим количеством папоротников. Довольно большие площади занимают старовозрастные посадки лиственницы.

В общей сложности на рассматриваемой территории выявлено 8 типов сообществ. Зафиксирован 91 вид растений, относящихся к 70 родам и 46 семействам, что составляет 5.7% от всей флоры Республики Татарстан. Высокую встречаемость (от 25% до 50%) имеют 17 видов. Остальные виды отличаются низкой встречаемостью (менее 25%), они неравномерно распределены на исследуемой территории. Наибольшей встречаемостью обладают липа сердцевидная (*Tilia*

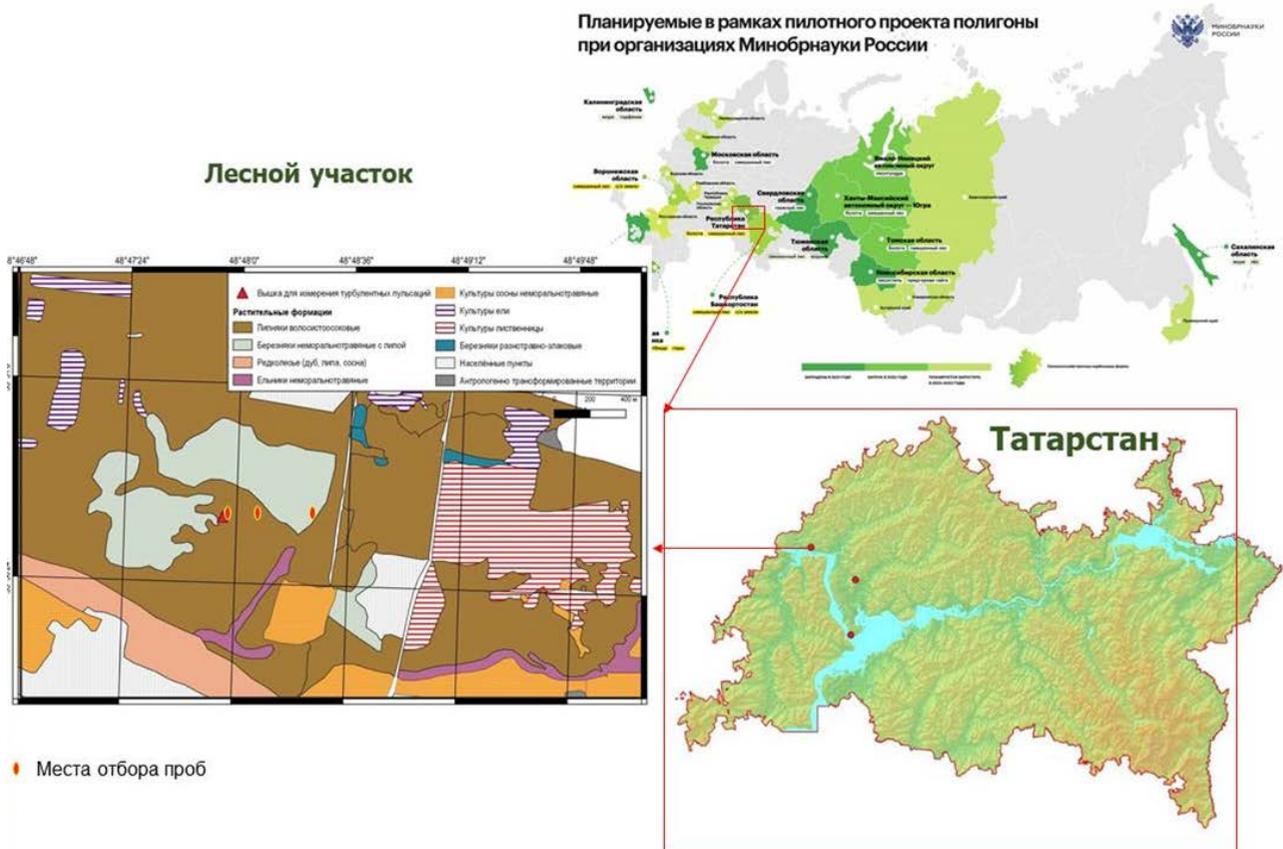


Рис. 1. Карбоновый полигон «Карбон – Поволжье»
Fig.1. Carbon polygon «Carbon – Povolzhye»

cordata Mill.) (97%), клен платановидный (*Acer platanoides* L.) (87.9%), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.) (75.8%).

Почвенный покров участка представлен дерново-подзолистыми почвами.

Почвенные разрезы (рис. 1) были заложены в июне 2023 г.: разрезы 1 и 2 в липняке волосисто-осоковом, разрез 3 – в березняке неморальнотравяном с липой.

Отбор проб почв производился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 и ГОСТ 17.4.4.02-2017. Пробы почв отбирали по генетическим горизонтам. Из каждого горизонта почвы было отобрано по одной объединенной пробе весом не менее 1 кг. Пробы почвы доставлялись в лабораторию для дальнейшей пробоподготовки (удаление растительных остатков, измельчение, сушка, заморозка). Гранулометрический состав почв определяли в соответствии со стандартом ISO 13220:2020 с использованием лазерного дифрактометра Microtrac Bluewave (Microtrac Retsch GmbH, Германия).

Для определения содержания общего углерода использовали воздушно-сухие пробы почвы, которые хранились при температуре 20°C, для определения численности бактерий и микромицет пробы хранили при -4°C, содержание микробной биомассы определяли в день отбора проб.

Содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) устанавливалось на термоградиентном анализаторе углерода LECO RC 612 (LECO Instruments, США) согласно ISO 10694:1995. Детекция CO₂ осуществлялась ИК-ячейкой прибора. Содержание углерода в образцах определялось в процессе термического разложения при температуре 450 °C на основании площади пика. В качестве стандартов калибровки использовался карбонат кальция производства LECO (США).

Выделение тотальной ДНК из образцов массой 0.3 г производили с использованием набора FastDNA SpinKi tFor Soil (MP Bio, Germany). Для очищения ДНК применяли QIAquick PCR Purification Kit (Quiagen, Germany). Численность бактериальных и грибных штаммов анализировали методом ПЦР в реальном времени (ISO 17601:2016) с использованием двух пар праймеров: 947f/1349r и ITS1f/ITS2r в амплификаторе BioRad CFX-96 cyclor (BioRad, Munich, Germany) с последовательностями f: AACGCGAAGAACCTTAC, r: CGGTGTGTACAAGCCCGGAACG (для бактерий) и f: TCCGTAGGTGAACCTGCGG, r: GCTGCGTTCTTCATCGATGC (для микромицет). Для амплификации использовали следующую программу: первичная денатурация при 95°C в течение 5 минут, далее 39 трехступенчатых ци-

клов при 62-60°C в течение 45 секунд, при 95°C в течение 15 секунд, и при 72°C в течение 30 секунд. Рабочий раствор для амплификации имел следующий состав (25 мкл): матричная ДНК – 1 мкл, праймеры (10 мкМоль) – по 0.5 мкл, dNTP (10 мМоль) – 2.5 мкл, TaqBuffer (10X) – 2.5 мкл, MgCl₂ (25 мМоль) – 2.5 мкл, Taq polymerase (5 ед./мкл) – 0.2 мкл и ddH₂O – 15.3 мкл. Для построения калибровочных кривых использовали бактерию *Pseudomonas putida* и микромицет *Penicillium notatum*.

Микробную биомассу ($C_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 14240-1:1997 (Part 1). К навеске почвы массой 1 г добавляли 10 мг D-глюкозы в качестве легкодоступного питательного субстрата помещали в хроматографическую вials и инкубировали в течение 24 суток при температуре 20°C, увеличение концентрации CO₂ детектировали на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесённой фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец.

Анализ запасов почвенного углерода проводили согласно методике количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, утвержденной Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.05.2022 №371 в модификации. Пересчет на запас углерода почвы производился с учетом объемной массы почвы (г/см³) по формуле:

$$C_{\text{почва}} = C_{\text{общ}} \cdot H \cdot V, \text{ где}$$

$C_{\text{почва}}$ – запас углерода в пуле почвы, т С/га;
 $C_{\text{общ}}$ – содержание общего углерода в образце почвы, %;
 H – мощность слоя (горизонта) почвы, см;
 V – объемная масса почвы, г/см³.

Объемная масса почвы была взята из литературных источников для подтипа дерново-подзолистых почв (Завьялова и др., 2018).

Все измерения проводились не менее чем в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили в программе MS Excel. На графиках представлены средние значения, в таблицах приведены средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0.05$.

Результаты и их обсуждение

Дерново-подзолистые почвы карбонового полигона (табл. 1) отличает маломощная (2–5 мм) подстилка, которая представлена растительным

Таблица 1. Морфологическое описание почвенных разрезов
Table 1. Morphological description of soil profile

Разрез 1 Soil section 1		Разрез 2 Soil section 2			Разрез 3 Soil section 3			
Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Морфологические признаки Morphological characteristics	Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Морфологические признаки Morphological characteristics	Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Морфологические признаки Morphological characteristics
A ₀	0-1	Листовой опад	A ₀	0-1	Листовой опад	A ₀	0-1	Листовой опад
A ₁	1-20	Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, рыхлый, переход незаметный	A ₁	1-20	Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, рыхлый, переход незаметный	A ₁	1-10	Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, переход незаметный
A ₁ A ₂	20-35	Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, комковато-пылеватый, твердоватый, переход постепенный	A ₁ A ₂	20-37	Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, комковато-пылеватый, твердоватый, переход постепенный	A ₁ A ₂	10-37	Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, прочнокомковатый, твердоватый, переход постепенный
A ₂	35-48	Светло-серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный	A ₂	37-70	Светло серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный	A ₂	37-52	Светло серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный
B	48-90	Желтый, влажноватый, супесчаный, твердоватый	B ₁	70-100	Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый, переход постепенный	B ₁	52-80	Желтый, влажноватый, супесчаный, твердоватый, бесструктурный, переход постепенный
			B ₂	100-130	Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый	B ₂	80-100	Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый

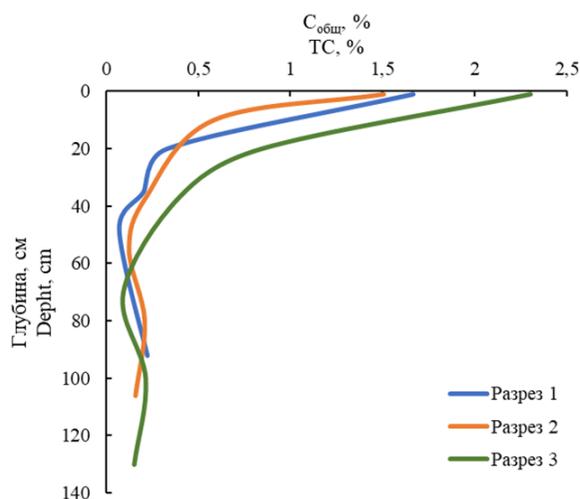


Рис. 2. Распределение содержания общего углерода ($C_{общ}$) в профиле почв
Fig. 2. Distribution of total carbon content in soil profile

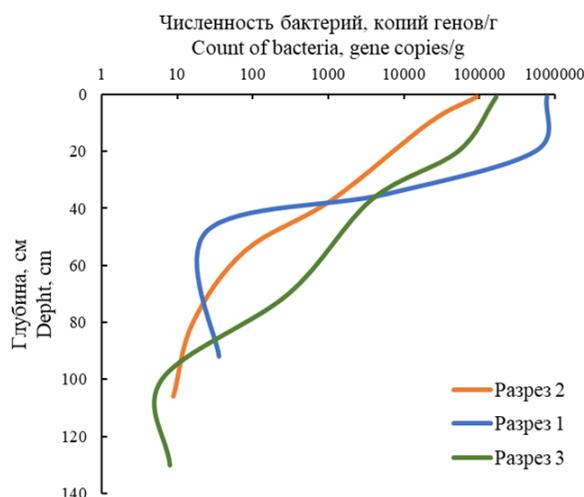


Рис. 3. Распределение численности бактерий в профиле почв
Fig. 3. Distribution of soil bacteria number in soil profile

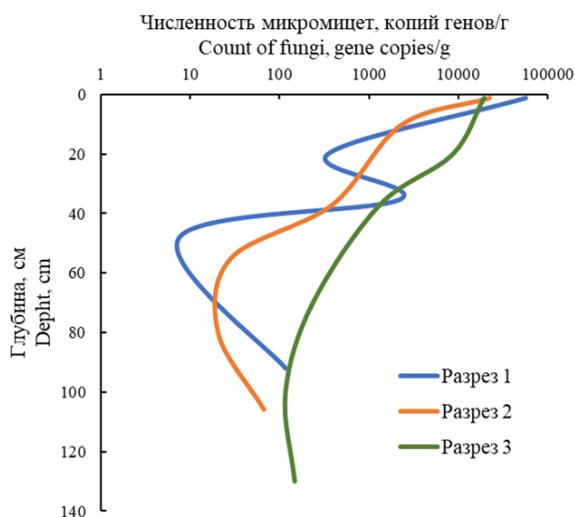


Рис. 4. Распределение численности микромицет в профиле почв
Fig. 4. Distribution of micromycetes number in soil profile

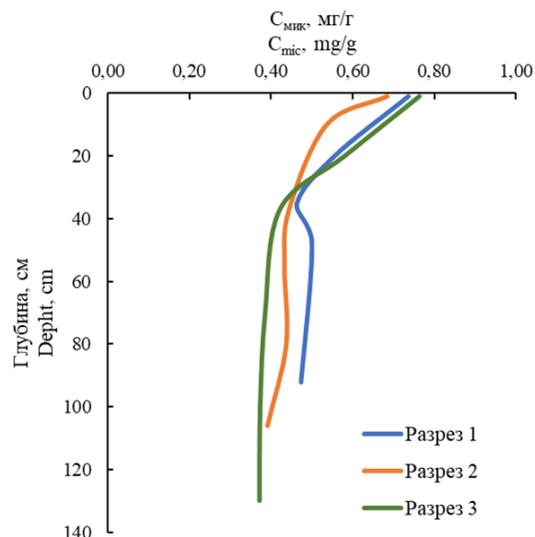


Рис. 5. Распределение микробной биомассы в профиле почв
Fig. 5. Distribution of microbial biomass in soil profile

опадом разной степени разложения.

Максимальное содержание общего углерода отмечено в горизонте A_1 (1.51-2.30%), минимальное – в горизонте A_2 (0.07-0.12%). При этом содержание $C_{общ}$ в горизонтах A_1A_2 , B_1 , B_2 достоверно не изменялось и составляло 0.15-0.39%. Наиболее выраженное снижение содержания $C_{общ}$ было отмечено при переходе от горизонта A_1 к горизонту A_1A_2 – на 61-80% (рис. 2).

Аналогичные показатели при определении содержания $C_{общ}$ в дерново-подзолистых почвах Республики Татарстан были получены Д.В. Ивановым и А.Б. Александровой (2022): содержание

гумуса в верхнем горизонте почв достигало 2.0-4.5% и также снижалось с глубиной. Содержание $C_{общ}$ в слое 0-20 см дерново-подзолистой почвы под лесами на территории Вологодской и Костромской областей варьировало от 0.9 до 6.5% (Кудреватых и др., 2021).

Наибольшая численность бактерий наблюдалась в горизонте A_1 (от $7.72 \cdot 10^5$ до $9.15 \cdot 10^4$ копий генов/г) и снижалась с глубиной примерно так же, как и содержание гумуса (рис. 3). В горизонтах A_2 , B_1 , B_2 численность бактерий составляла от 6 до 77 копий генов/г.

Общая тенденция снижения численности с

увеличением глубины установлена и для микромицет. Так, от горизонта A_1 к горизонту A_1A_2 количество микромицет сократилось с $1.96 \cdot 10^4 - 5.74 \cdot 10^4$ копий генов/г до $3.46 \cdot 10^2 - 8.67 \cdot 10^3$ копий генов/г. На глубине 40–130 см численность микромицет достоверно не изменялась и составляла 21–235 копий генов/г.

Разрез 3 по сравнению с двумя другими разрезами характеризовался большей численностью микромицет. В разрезе 1 их численность сократилась с $5.74 \cdot 10^4$ копий генов/г в горизонте A_1 до $3.46 \cdot 10^2$ копий генов/г в горизонте A_1A_2 , а далее в горизонте A_2 она вновь возросла до $2.29 \cdot 10^3$ копий генов/г. Однако статистический анализ показал отсутствие достоверных различий между горизонтами по этому показателю ($\alpha < 0.05$). Схожие результаты изменения численности микромицет в почвах с глубиной были получены в целом ряде исследований (Ekelund et al., 2001; Liu et al., 2013; Neville et al., 2002; Xue et al., 2023).

Максимальное содержание углерода микробной массы ($C_{\text{мик}}$) также характерно для горизонта $A_1 - 0.69 - 0.76$ мг/г. Максимальное ее снижение наблюдается в пределах верхних 40 см – на 22–25%. Стоит отметить, что для разреза 1 установлено увеличение содержания $C_{\text{мик}}$ в горизонте A_2 до 0.50 мг/г. В горизонтах A_2, B_1, B_2 содержание $C_{\text{мик}}$ достоверно не изменяется и варьирует в диапазоне 0.37–0.50 мг/г. Снижение микробной биомассы в зависимости от глубины описано во многих работах (Naylor et al., 2022; Chen et al., 2022; Xu et al., 2021). Аналогичный диапазон содержания $C_{\text{мик}}$ (0.20–0.80 мг/г) в слое 0–20 см характерен для дерново-подзолистых почв лесов Вологодской и Костромской областей (Кудреватых и др., 2021). В работе Е.А. Сусьяна (Сусьян и др., 2009) также было зафиксировано снижение $C_{\text{мик}}$ в лесных почвах с глубиной: от верхнего горизонта к нижнему значение показателя уменьшалось почти в 2 раза.

Запасы общего и микробного углерода в почвах полигона рассчитывали для слоев 0–30 см, 30–50 см, 50–100 см, 0–100 см в соответствии с «Методикой количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Приказ Минприроды РФ от 27.05.2022 №371).

Максимальные запасы общего углерода содержатся в верхнем 30-см слое, объединяющем горизонт A_1 и A_1A_2 , и составляют 32.36 ± 13.45 т/га, из которых 7% приходится на углерод микробной биомассы (2.29 ± 0.21 т/га). С глубиной запасы углерода закономерно снижаются. Согласно данным классификации запасов углерода в почвах, приведенной в Национальном атласе почв Российской Федерации (2011), рассчитанный запас углерода в слое почвы 0–100 см на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» оценивается как низкий.

В слое 0–30 см содержится 67% от запасов общего и 29% микробного углерода. При этом запас углерода в нижних слоях почвы (30–100 см) также достаточно высок 15.7 т/га, поскольку углерод в них подвергается меньшей минерализации. Именно поэтому анализ запасов углерода должен включать исследование всего профиля (Сидорова и др., 2023).

Полученные значения превышают средний показатель запаса углерода для лесных почв Европейской части России (Щепашенко и др., 2013). Однако, более поздние результаты расчета запаса углерода, представленные другими исследователями, совпадают с данными настоящей работы и варьируются в диапазоне 30–60 т/га (Чернова и др., 2021; Завьялова, 2022; Кулагина и др., 2023). В работе А.Б. Александровой (Александрова и др., 2015) запас гумуса в слое 0–20 см дерново-подзолистых пахотных почв Республики Татарстан оценен в 22–57 т/га. Оценки запасов углерода в почвах лесных экосистем Татарстана (Ива-

Таблица 2. Распределение запасов почвенного углерода по глубине на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье»

Table 2. Distribution of soil carbon deposits by depth on the territory of the carbon polygon «Carbon – Povolzhye»

Глубина, см Depth, cm	Общий углерод, т/га Total carbon, t/ha	Микробный углерод, т/га Microbial biomass, t/ha
0–30	32.36 ± 13.45	2.29 ± 0.21
30–50	4.78 ± 1.15	1.05 ± 0.11
50–100	10.92 ± 0.97	1.55 ± 0.74
0–100	48.06 ± 13.86	4.89 ± 1.13

нов, Александрова, 2022) показывают, что для слоя 0–30 см дерново-подзолистых супесчаных почв характерно содержание углерода на уровне 45 т/га, а в слое 0–100 см – 53 т/га.

Заключение

Установлено, что почва на территории карбонного полигона «Карбон – Поволжье» относится к дерново-подзолистым, имеет характерное для данных почв распределение горизонтов, содержание общего и микробного углерода, численность бактерий и микромицет. Показано, что с увеличением глубины снижается содержание общего и микробного углерода, содержание бактерий и микромицет, а также респираторная активность. Максимальное снижение оцененных показателей установлено от горизонта A_1 к горизонту A_2 (при переходе с 0 до 35–54 см), при этом максимальное уменьшение отмечено для численности бактерий на 98–99%, минимальное для $C_{\text{мик}}$ на 35–45%. Суммарный запас общего углерода в слое 0–100 см составил $48,05 \pm 13,86$ т/га, запас микробного углерода $4,89 \pm 1,13$ г/га. Несмотря на низкие концентрации общего и органического углерода в горизонтах A_2 , B_1 , B_2 вклад данных горизонтов в общий запас составил 22–40% и 51–58%, соответственно, что обусловлено достаточно большой мощностью этих горизонтов (44–60 см). Таким образом, для оценки запасов углерода и дальнейшего расчета его баланса для каждого типа экосистемы необходимо учитывать запас углерода не только в верхнем слое, но и распределение его по профилю.

Список литературы

1. Александрова А.Б., Иванов Д.В., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Марасов А.А., Паймикина Э.Е., Рупова Э.Х. Динамика содержания гумуса и его запасов в почвах Республики Татарстан // *Российский журнал прикладной экологии*. 2015. №3. С. 13–17.
2. Бакаева З.М., Замолодчиков Д.Г. Запасы и потоки углерода в лесах Северного Кавказа // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский Регион. Естественные науки*. 2009. №5. С. 78–87.
3. ГОСТ 17.4.3.01–2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
4. ГОСТ 17.4.4.02–2017. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
5. Завьялова Н. Е. Васбиева М.Т., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Морфолого-генетическая характеристика профиля дерново-подзолистой почвы смешанного леса Предуралья // *Известия ОГАУ*. 2018. №2. С. 99–101.
6. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // *Почвоведение*. 2022. №8. С. 1046–1055. doi: 10.31857/S0032180X22080160.
7. Иванов Д.В., Александрова А.Б. Предварительные оценки запасов углерода в почвах лесных экосистем Республики Татарстан // *Российский журнал прикладной экологии*. 2022. №2. С. 56–60. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.56.60>.
8. Карбоновые полигоны Российской Федерации (2021). // URL: <https://carbon-polygons.ru> (дата обращения 12.09.2023).
9. Кудреватых И.Ю., Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иванищева Е.А. Химические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы в лесах вологодской и костромской областей // *Лесоведение*. 2021. №1. С. 93–106. doi: 10.31857/S002411482101006X
10. Кулагина В.И., Александрова А.Б., Рязанов С.С., Шагидуллин Р.Р., Андреева А.А., Кольцова Т.Г. Запасы органического углерода в почвах Раифского участка Волжско-Камского заповедника // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2023. №1. С. 143–158.
11. Ларионов Ю.С. Роль углерода и круговороты на его основе как предпосылки совершенствования системы мониторинга плодородия почв // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. С. 124–134. doi: 10.33764/2618-981.
12. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель:АСТ, 2011. 632 с.
13. Прянишникова Д.Н., Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // *Агрохимия*. 2015. №11. С. 3–12.
14. Сидорова В.А., Юркевич М.Г., Бахмет О.Н. Моделирование вертикального распределения содержания углерода в почвах при разных типах землепользования // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2023. №2. С. 192–196. doi: 10.55186/25876740.
15. Сорокин Н.Д., Александров Д.Е. Микробиологическая трансформация углерода и азота в лесных почвах Средней Сибири // *Вестник КрасГАУ*. 2013. №61. С. 74–78. doi: 10.33764/2618-981.
16. Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В. Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв южной тайги // *Почвоведение*. 2009. №10. С. 1233–1240.
17. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // *Почвоведение*. 2021. №3. С. 273–286. doi: 10.31857/S0032180X21030047.
18. Чимитдоржиева Э.О. Запасы углерода в постагрогенных сухостепных почвах западного Забайкалья // *Аридные экосистемы*. 2017. №3. С. 59–65.
19. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // *Почвоведение*. 2013. №2. С. 123–132.
20. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European journal of soil science*. 1996, Vol. 47. № 3. P. 151–163 doi: doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x.
21. Chappell A., Baldock J., Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes // *Nature climate change*. 2015. Vol. 6. P. 187–191. doi: 10.1038/nclimate2829.
22. Chen X., Feng J., Ding Z., Tang M., Zhu B. Changes in soil total, microbial and enzymatic C-N-P contents and stoichiometry with depth and latitude in forest ecosystems // *Science of the total environment*. 2022. Vol. 816. P. 1–10. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151583.
23. Ekelund F., Ronn R., Christensen S. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites // *Soil biology and biochemistry*. 2001. Vol. 33. P. 475–481. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00188-7.
24. He Q., Wu Y., Wang J., Bing H. Community rRNA operon copy number of soil bacteria decreases with soil depth

and ecosystem succession in postglacial ecosystems // Applied soil ecology. 2023. Vol. 186. P. 1–4. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104817.

25. ISO 10694:1995. Soil quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).

26. ISO 16072:2002. Soil quality. Laboratory methods for determination of microbial soil respiration.

27. ISO 17601:2016. Soil quality. Estimation of abundance of selected microbial gene sequences by quantitative PCR from DNA directly extracted from soil.

28. Liao Q., Lu C., Yuan F., Fan Q., Chen H., Yang L. Soil carbon-fixing bacterial communities respond to plant community change in coastal salt marsh wetlands // Applied soil ecology. 2023. Vol. 189. P. 1–10. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104918.

29. Liu R.J., Li Y., Diao Z.K., Li M., Lin X.G. Effects of soil depth and season variation on community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in greenhouse soils planted with watermelon // Pedosphere. 2013. Vol. 23. P. 350–358. doi: 10.1016/S1002-0160(13)60026-0.

30. Mason A.R.G., Salomon M.J., Lowe A.J., Cavagnaro T.R. Microbial solutions to soil carbon sequestration // Journal of cleaner production. 2023. Vol. 417. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137993.

31. Naylor D., McClure R., Jansson J. Trends in microbial community composition and function by soil depth // Microorganisms. 2022. Vol. 10. P. 1–26. doi: 10.3390/microorganisms10030540.

32. Neville J., Tessier J. L., Morrison I., Scarratt J., Canning B., Klironomos J.N. Soil depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut // Applied soil ecology. 2002. Vol. 19. P. 209–216. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00193-7.

33. Wang Y., Li C., Hu S. Land use effects on the dynamics of soil carbon, nitrogen and microbes in the water-wind erosion crisscross region of the northern Loess Plateau // Pedosphere. 2023. Vol. 33. P. 1–17. doi: 10.1016/j.pedsph.2023.03.019.

34. Xu T., Chen X., Hou Y. et al. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Plant and soil. 2021. Vol. 459. P. 137–153. doi: 10.1007/s11104-020-04712-z.

35. Xu T., Shen Y., Ding Z., Zhu B. Seasonal dynamics of microbial communities in rhizosphere and bulk soils of two temperate forests // Rhizosphere. 2023. Vol. 25. P. 1–9. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100673.

36. Xue P., Minasny B., McBratney A., Jiang Y., Luo Y. Land use effects on soil protists and their top-down regulation on bacteria and fungi in soil profiles // Applied soil ecology. 2023. Vol. 185. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104799.

References

1. Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Malanin V.V., Hasanov R.R., Marasov A.A., Pajmikhina E.E., Rupova E.H. Dinamika sodержaniya gumusa i ego zapasov v pochvah Respubliki Tatarstan [Dynamics of humus content and its reserves in the soils of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2015. No 3. P. 13–17.

2. Bakaeva Z.M., Zamolodchikov D.G. Zapasy i potoki ugleroda v lesah Severnogo Kavkaza [Carbon stocks and flows in the forests of the North Caucasus] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij Region. Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences.]. 2009. No 5. P. 78–87.

3. GOST 17.4.3.01-2017. Oхрана природы. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Nature Protection. Soils. General sampling requirements].

4. GOST 17.4.4.02-2017. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis].

5. Zav'yalova N. E. Vasbieva M.T., Fomin D.S., Teterlev I.S. Morfologo-geneticheskaya karakteristika profilya derno-podzolistoj pochvy smeshannogo lesa Predural'ya [Morphological and genetic characteristics of the profile of soddy-podzolic soil in a mixed forest in the Cis-Ural region] // Izvestiya OGAU [News of the Orenburg Agrarian University]. 2018. No 2. P. 99–101.

6. Zav'yalova N.E. Uglерodprotektornaya emkost' derno-podzolistoj pochvy estestvennyh i agroekosistem Predural'ya [Carbon protective capacity of sod-podzolic soil of natural and agroecosystems of the Cis-Urals] // Pochvovedenie [Soil science]. 2022. No 8. P. 1046–1055. doi 10.31857/S0032180X22080160.

7. Ivanov D.V., Aleksandrova A.B. Predvaritel'nye ocenki zapasov ugleroda v pochvah lesnyh ekosistem respubliky Tatarstan [Preliminary estimates of carbon reserves in soils of forest ecosystems of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 2. P. 56–60. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.56.60>.

8. Karbonovye poligony Rossijskoj Federacii [Carbon polygons of the Russian Federation] (2021). // URL: <https://carbon-polygons.ru> (data obrashcheniya 12.09.2023).

9. Kudrevatyh I.YU., Anan'eva N.D., Sushko S.V., Ivanishcheva E.A. Himicheskie i mikrobiologicheskie svoystva derno-podzolistoj pochvy v lesah vologodskoj i kostromskoj oblastej [Chemical and microbiological properties of sod-podzolic soil in the forests of the Vologda and Kostroma regions] // Lesovedenie [Fofestry]. 2021. No 1. P. 93–106. doi 10.31857/S002411482101006X.

10. Kulagina V.I., Aleksandrova A.B., Ryazanov S.S., SHagidullin R.R., Andreeva A.A., Kol'cova T.G. Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Organic carbon reserves in soils of the Raifa section of the Volga-Kama Nature Reserve] // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya [Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Biology. Chemistry.]. 2023. No 1. P. 143–158.

11. Larionov Yu.S. Rol' ugleroda i krugovoroty na ego osnove kak predposylki sovershenstvovaniya sistemy monitoringa plodorodiya pochv [The role of carbon and cycles based on it as a prerequisite for improving the soil fertility monitoring system] // Interekspo Geo-Sibir'. 2019. P. 124–134. doi 10.33764/2618-981.

12. Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii [National soil atlas of the Russian Federation]. Moscow: Astrel':AST, 2011. 632 p.

13. Pryanishnikova D.N., Semenov V.M., Lebedeva T.N. Problema ugleroda v ustojchivom zemledelii: agrohimiicheskie aspekty [The problem of carbon in sustainable agriculture: agrochemical aspects] // Agrohimiya [Agrochemistry]. 2015. No 11. P. 3–12.

14. Sidorova V.A., Yurkevich M.G., Bahmet O.N. Modelirovanie vertikal'nogo raspredeleniya sodержaniya ugleroda v pochvah pri raznyh tipah zemlepol'zovaniya [Modeling of the vertical distribution of carbon content in soils under different types of land use] // Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal [International Agricultural journal]. 2023. No 2. P. 192–196. doi 10.55186/25876740.

15. Sorokin N.D., Aleksandrov D.E. Mikrobiologicheskaya transformaciya ugleroda i azota v lesnyh pochvah Srednej Sibiri [Microbiological transformation of carbon and nitrogen in forest soils of Central Siberia] // Vestnik KrasGAU [Bulletin of

- Krasnoyarsk state agrarian university]. 2013. No 61. P. 74–78. doi 10.33764/2618-981.
16. Sus'yan E.A., Anan'eva N.D., Gavrilenko E.G., Chernova O.V., Bobrovskij M.V. Uglерod mikrobnой biomassy v profile lesnyh pochv yuzhnoj tajgi [Carbon of microbial biomass in the profile of forest soils of the southern taiga] // *Pochvovedenie [Soil science]*. 2009. No 10. P. 1233–1240.
17. Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Shchepashchenko D.G. Kompleksnyj podhod k kartograficheskoj oцenke zapasov organicheskogo uglерoda v pochvah Rossii [An integrated approach to the cartographic assessment of organic carbon reserves in Russian soils] // *Pochvovedenie [Soil science]*. 2021. No 3. P. 273–286. doi 10.31857/S0032180X21030047.
18. Chimitdorzhieva E.O. Zapasy uglерoda v postagrogennyh suhostepnyh pochvah zapadnogo Zabajkal'ya [Carbon reserves in postagrogenic dry steppe soils of western Transbaikalia] // *Aridnye ekosistemy [Arid ecosystems]*. 2017. No 3. P. 59–65.
19. Shchepashchenko D.G., Muhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Zapasy organicheskogo uglерoda v pochvah Rossii [Organic carbon reserves in Russian soils] // *Pochvovedenie [Soil science]*. 2013. No 2. P. 123–132.
20. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European journal of soil science*. 1996. Vol. 47. No 3. P. 151–163. doi: doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x.
21. Chappell A., Baldock J., Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes // *Nature climate change*. 2015. Vol. 6. P. 187–191. doi: 10.1038/nclimate2829.
22. Chen X., Feng J., Ding Z., Tang M., Zhu B. Changes in soil total, microbial and enzymatic C-N-P contents and stoichiometry with depth and latitude in forest ecosystems // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 816. P. 1–10. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151583.
23. Ekelund F., Ronn R., Christensen S. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites // *Soil biology and biochemistry*. 2001. Vol. 33. P. 475–481. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00188-7.
24. He Q., Wu Y., Wang J., Bing H. Community rRNA operon copy number of soil bacteria decreases with soil depth and ecosystem succession in postglacial ecosystems // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 186. P. 1–4. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104817.
25. ISO 10694:1995. Soil Quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).
26. ISO 16072:2002. Soil quality. Laboratory methods for determination of microbial soil respiration.
27. ISO 17601:2016. Soil quality. Estimation of abundance of selected microbial gene sequences by quantitative PCR from DNA directly extracted from soil.
28. Liao Q., Lu C., Yuan F., Fan Q., Chen H., Yang L. Soil carbon-fixing bacterial communities respond to plant community change in coastal salt marsh wetlands // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 189. P. 1–10. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104918.
29. Liu R.J., Li Y., Diao Z.K., Li M., Lin X.G. Effects of soil depth and season variation on community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in greenhouse soils planted with watermelon // *Pedosphere*. 2013. Vol. 23. P. 350–358. doi: 10.1016/S1002-0160(13)60026-0.
30. Mason A.R.G., Salomon M.J., Lowe A.J., Cavagnaro T.R. Microbial solutions to soil carbon sequestration // *Journal of cleaner production*. 2023. Vol. 417. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137993.
31. Naylor D., McClure R., Jansson J. Trends in microbial community composition and function by soil depth // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. P. 1–26. doi: 10.3390/microorganisms10030540.
32. Neville J., Tessier J. L., Morrison I., Scarratt J., Canning B., Klironomos J.N. Soil depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut // *Applied soil ecology*. 2002. Vol. 19. P. 209–216. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00193-7.
33. Wang Y., Li C., Hu S. Land use effects on the dynamics of soil carbon, nitrogen and microbes in the water-wind erosion crisscross region of the northern Loess Plateau // *Pedosphere*. 2023. Vol. 33. P. 1–17. doi: 10.1016/j.pedsph.2023.03.019
34. Xu T., Chen X., Hou Y. et al. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // *Plant and soil*. 2021. Vol. 459. P. 137–153. doi: 10.1007/s11104-020-04712-z.
35. Xu T., Shen Y., Ding Z., Zhu B. Seasonal dynamics of microbial communities in rhizosphere and bulk soils of two temperate forests // *Rhizosphere*. 2023. Vol. 25. P. 1–9. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100673.
36. Xue P., Minasny B., McBratney A., Jiang Y., Luo Y. Land use effects on soil protists and their top-down regulation on bacteria and fungi in soil profiles // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 185. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104799.

Alexandrova L., Gordeev A.S., Babichuk V.R., Kuryntseva P.A., Selivanovskaya S.Yu. **The estimation of carbon content in soil on the territory of the carbon polygon «Carbon – Povolzhye».**

An understanding of the accumulation of carbon in different pools, in particular in the soil, is necessary if we aim to develop technologies for reducing greenhouse gas emissions. We studied the content of total and microbial carbon, the number of bacteria and micromycetes for each soil horizon when establish the carbon reserve in the soil on the territory of the «Carbon – Povolzhye» carbon polygon. The carbon polygon «Carbon – Povolzhye» is located on soddy-podzolic soils with a typical distribution of horizons. With increasing depth the total carbon content (by 87–93%) and microbial carbon content (by 43–51%), the count of bacteria (by 99%) and the count of fungi (by 99%) decreased. The calculated total soil organic carbon stock was 48.05±13.86 t/ha, the stock of microbial carbon was 4.89±1.13 t/ha.

Keywords: carbon polygon; soddy-podzolic soils; carbon reserves in soils; total carbon; microbial carbon; Republic of Tatarstan.

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: 17.10.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 02.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 21.11.2023

Сведения об авторах

Александрова Людмила, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: LDAleksandrova@stud.kpfu.ru.

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: drgor@mail.ru.

Бабичук Вячеслав Романович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: slavababichuk@gmail.com.

Курынцева Полина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

Селивановская Светлана Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, директор Института, Казанский Приволжский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru.

Information about the authors

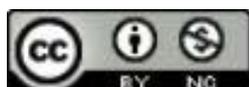
Ludmila Aleksandrova, Student, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: LDAleksandrova@stud.kpfu.ru.

Alexander S. Gordeev, Researcher, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: drgor@mail.ru.

Vyacheslav R. Babichuk, Student, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: slavababichuk@gmail.com.

Polina A. Kuryntseva, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

Svetlana Yu. Selivanovskaya, D.Sci. in Biology, Professor, Director of the Institute, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru.



ВЗАИМОСВЯЗЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ И НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ РАСТЕНИЙ ТРАВЯНО-КУСТАРНИЧКОВОГО ЯРУСА В ЭКОСИСТЕМЕ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА

Исследование посвящено взаимосвязям между функциональными признаками листьев, высотой и надземной биомассой растений травяно-кустарничкового яруса лесной экосистемы карбонового полигона в Зеленодольском районе Республики Татарстан. Обнаружена значительная изменчивость функциональных признаков растений на исследованных участках, что может быть связано с такими факторами среды как освещенность, влажность почвы и содержание в ней элементов питания растений. Показано, что через функциональные признаки доминантных видов растений можно охарактеризовать то, как они занимают объем своего яруса. Наличие взаимосвязей между функциональными признаками растений и надземной биомассой подчеркивает их существенное влияние на продуктивность экосистемы. Отмечается необходимость комплексного подхода, учитывающего функциональные характеристики растений различных ярусов.

Ключевые слова: карбоновый полигон; лесные экосистемы; функциональные признаки растений; травяно-кустарничковый ярус; продуктивность экосистемы.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.22.29>

Введение

Научные подходы, основанные на функциональных признаках, все больше способствуют установлению связи между изменениями окружающей среды и изменчивостью растительных сообществ (Lavorel, Garnier, 2002).

Лист является важным органом растений, служащим для трансформации солнечной энергии в биологическую посредством фотосинтеза (Garnier et al., 2001). Размер листьев, их количество, функциональные признаки и фотосинтетическая способность тесно связаны с размерами растений и конкурентными способностями в растительных сообществах (Funk, Cornwell, 2013).

Удельная площадь листьев (SLA), определяемая как площадь листьев на единицу сухой массы, является одним из наиболее широко изученных признаков в экологии растений (Garnier, 1991). SLA является ключевым признаком, который описывает компромиссы между структурными характеристиками листа, накоплением углерода и содержанием питательных веществ, отражая положение видов растений в спектре продуцирования и сохранения биомассы (Wright et al., 2004).

Высота растений оценивается как расстояние от верхней границы основных фотосинтетически активных тканей растения до поверхности субстрата (Cornelissen et al., 2003). Научные исследования подтверждают, что высота растений коррелирует с другими их характеристиками, такими

как диаметр стебля, площадь среза корней, длина корней и общая надземная биомасса (Cornelissen et al., 2003; Osada, 2011).

Понимание корреляций между функциональными признаками листьев, высотой растений и надземной биомассой имеет важное прикладное значение. Функциональные признаки, связанные с высоким накоплением биомассы, позволяют лучше оценить потенциал экосистем по поглощению углерода. Изучение этих корреляций может улучшить прогноз реакции экосистем на изменение климата и другие экологические нарушения. В первую очередь внимание стоит уделить подробной оценке годичного цикла углерода, ответственного за баланс важнейших парниковых газов – углекислого газа и метана.

Республика Татарстан относится к числу наиболее развитых промышленных и сельскохозяйственных регионов России, где проживает более 3 млн. человек, поэтому проблеме мониторинга парниковых газов здесь уделяется большое внимание. В соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 05.02.2021 №74 «О создании на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытательных технологий контроля углеродного баланса, системы мониторинга парниковых газов в экосистемах России» вблизи г. Казани в естественных условиях создан карбоновый полигон с целью наблюдения за антропогенной и естественной эмис-

сией парниковых газов.

Цель настоящей статьи – определить возможность оценки функции поглощения углерода экосистемой карбонового полигона через связи между функциональными признаками листьев, высотой растений и надземной биомассой.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на территории Зеленодольского района Республики Татарстан на окраине карбонового полигона «Карбон – Поволжье». Полигон расположен в широколиственном лесу, состоящим из волосисто-осокового липняка с елью и дубом на дерново-подзолистых почвах, сформированных на аллювиально-делювиальных четвертичных отложениях третьей надпойменной террасы р. Волга, испытывающей антропогенное давление средней интенсивности.

В работе использовался материал, собранный во время пика вегетационного периода (середина июля 2023 года) с травяно-кустарничкового яруса четырех пробных площадок (ПП) размером 25×25 м. Видовой состав травяно-кустарничкового яруса и баллы проективного покрытия приводятся в таблице 1.

Для исследования были взяты функциональные признаки четырех доминирующих видов, которые в совокупности составляют не менее 75% от общего покрытия сообщества (Cornelissen et al., 2003): сныть обыкновенная (*Aegodium podagraria*), осока волосистая (*Carex pilosa*), страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris*), пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*). Баллы обилия пересчитаны в проценты проективного покрытия по методике Б.А. Быкова (Быков, 1978), для сор3 – 50%, для сор2 – 12%, для сор1 – 2.4%.

Отбор и измерение признаков проводили в соответствии с международным протоколом измерений функциональных признаков (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Измеряли листья и высоты хорошо сформированных растений каждого вида в экологических условиях, соответствующих их обычным местообитаниям. Для каждого вида проводили 25 измерений.

Высоту (h) измеряли в метрах, как кратчайшее расстояние от верхней границы фотосинтетических тканей (верхнего хорошо развитого листа) до субстрата. Листья собирали в гербарные сетки, и в условиях стационара проводили измерения площади и массы листьев. Площадь листьев (LA, см²) измеряли при помощи приложения Easy Leaf Area для ОС Android (Easlon, Bloom, 2014). Массу свежих (LM, г) и сухих (LDW, мг) листьев измеряли при помощи электронных весов DEMCOM

DL-103 с точностью до 0.001 г.

Удельную площадь листовой поверхности (SLA, см²/г) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC, мг/г) рассчитывали по измеренным функциональным признакам листьев. Удельную площадь листовой поверхности измеряли как отношение площади листа к его сухой массе, а содержание сухого вещества как отношение сухой массы листа к его сырой массе.

Средневзвешенные по сообществу значения (CWM) признаков рассчитаны для каждой площадки. Для расчетов взяты значения признаков листьев и высота растений. Формула для расчета CWM признаков (Garnier et al., 2004):

$$CWM = \sum_{i=1}^S p_i \times trait_i$$

где S – общее число видов, p_i – относительное проективное покрытие вида i , $trait_i$ – значение признака вида i .

Для количественной оценки сухой биомассы растительности травяно-кустарничкового яруса проведен сбор всей надземной травянистой биомассы на трех площадках размером 0.5×0.5 м, случайным образом распределенных в пределах пробных площадок.

Статистическая обработка данных и построение модели выполнены в программной среде R (R Core Team, 2022). Проверку на нормальность распределения проводили с помощью теста Шапиро-Уилка. Все изученные параметры листьев имели нормальное распределение. Для оценки скоррелированности CWM признаков с надземной биомассой рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена.

Результаты и их обсуждение

Измеренные средние значения функциональных признаков растений травяно-кустарничкового яруса исследуемых площадок приведены в таблице 2. Так, для сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) более низкие значения признаков (площади листа, массы листа и др.) характерны для ПП 2, по сравнению с площадками 1 и 3. Например, наибольшая площадь листа у сныти наблюдается на ПП 3, а наименьшая на ПП 2, а наибольшая масса листа у сныти характерна для растений с ПП 3, а наименьшая со ПП 2. В свою очередь, наибольшая сухая масса листа у сныти отмечалась на ПП 2, а наименьшая на ПП 1. SLA сныти минимальна на ПП 2, максимальна на ПП 1. ПП 2 характеризуется более высоким значением высоты растений по сравнению с другими площадками.

Для осоки волосистой (*Carex pilosa*) можно

Таблица 1. Видовой состав и баллы обилия растений травяно-кустарничкового яруса пробных площадок (ПП)
Table 1. Species composition and abundance scores of herbaceous-shrub layer plants of the plotted sites

Вид Species	Баллы обилия по Друде-Уранову Abundance scores by Drude-Uranov			
	ПП 1 Plot 1	ПП 2 Plot 2	ПП 3 Plot 3	ПП 4 Plot 4
Страусник обыкновенный <i>Matteuccia struthiopteris</i>	cop3	cop3	sp	cop2
Сныть обыкновенная <i>Aegopodium podagraria</i>	cop2	cop2	cop2	sp
Копытень европейский <i>Asarum europaeum</i>	sp	sp	sp	sp
Подмаренник душистый <i>Galium odoratum</i>	sp	–	sp	sol
Медуница неясная <i>Pulmonaria obscura</i>	sp	sp	–	sp
Хвощ полевой <i>Equisetum arvense</i>	sp	sp	–	–
Лютик кашубский <i>Ranunculus cassubicus</i>	sp	–	–	sol
Осока волосистая <i>Carex pilosa</i>	cop 2	cop2	cop2	sp
Вороний глаз четырёхлистный <i>Paris quadrifolia</i>	sp	sp	sol	sol
Пролесник многолетний <i>Mercurialis perennis</i>	cop3	cop2	cop2	cop3
Кочедыжник женский <i>Athyrium filix-femina</i>	sp	sp	–	–
Крапива двудомная <i>Urtica dioica</i>	–	sp	–	sp
Будра плющевидная <i>Glechoma hederacea</i>	–	sp	–	sp
Купена многоцветковая <i>Polygonatum multiflorum</i>	–	sp	sp	un
Гравилат городской <i>Geum urbanum</i>	–	sp	un	sol
Яснотка крапчатая <i>Lamium maculatum</i>	–	sp	sp	sp
Чистец лесной <i>Stachys sylvatica</i>	–	sp	–	–
Борец северный <i>Aconitum septentrionale</i>	–	–	sol	sol
Фиалка удивительная <i>Viola mirabilis</i>	–	–	sol	un
Бор развесистый <i>Millium effusum</i>	–	–	sp	sp

отметить, что более низкие значения признаков, таких как площадь листа и масса листа, характерны для ПП 2 по сравнению с площадками 1 и 3. Наибольшая площадь листа у осоки наблюдается на ПП 3, в то время как на ПП 2 она существенно меньше. Аналогично, наибольшая масса листа отмечается на ПП 2, а наименьшая на ПП 1. Сухая масса листа также имеет минимальное значение на ПП 1 и максимальное на ПП 2. Относительная площадь листа (SLA) минимальна на ПП 2 и максимальна на ПП 3. Касательно высоты растений (h), наименьшее значение наблюдается на ПП 1, в то время как на ПП 3 она наибольшая.

Страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris*) демонстрирует различия признаков в зависимости от площадки. Наименьшая площадь листа наблюдается на ПП 2, в то время как на ПП 1 этот параметр достигает максимального значения. Максимальная масса листа также наблюдается на ПП 1, а минимальная масса

листа – на ПП 2. Сухая масса листа достигает максимального значения на ПП 1 и минимального – на ПП 4. Относительная площадь листа (SLA) максимальна на ПП 1 и минимальна на ПП 2. Высота растений (h) имеет минимальное значение на ПП 2 и максимальное на ПП 4.

Пролесник многолетний (*Mercurialis perennis*) характеризуется различиями в биометрических характеристиках в зависимости от площадки. Наименьшая площадь листа наблюдается на ПП 2, в то время как на ПП 1 этот параметр достигает максимального значения. Максимальная масса листа также наблюдается на ПП 1, а минимальная – на ПП 3. Сухая масса листа достигает максимального значения на ПП 1 и минимального значения на ПП 2. Относительная площадь листа (SLA) минимальна на ПП 2 и максимальна на ПП 1. Высота растений (h) имеет минимальное значение на ПП 3 и максимальное на ПП 4.

Индивидуальные значения признаков обнаруживают большую изменчивость от

площадки к площадке, что может свидетельствовать о неоднородных условиях произрастания и различной реакции индивидов на внешние факторы, такие как освещенность, содержание влаги и питательных веществ в почве. Уместно будет провести анализ функциональных признаков не выделяя площадки, как уникальные единицы со своими факторами и условиями, а объединить их и рассматривать их как одно сообщество, в нашем случае волосисто-осокового липняка с елью и дубом.

Растения в различных фитоценозах используют разный объем воздушной среды, который прямо связан с высотой растений. Высокие растения, как правило, доминируют в захвате света, эффективно конкурируя за ограниченные световые ресурсы. Малый объем среды (низкие растения) используется более равномерно, нежели большой, то есть дивергенция по высоте растений выше

в луговых сообществах, где сильнее выражены конкурентные взаимоотношения и выше уровень продукции (Дудова и др., 2019). В свою очередь в лесных сообществах более широкий диапазон высот (большая высота растений) дает большую возможность для дифференциации растений по этому признаку и способствует расхождению их экологических ниш (Costa et al., 2017; Рогова и др., 2022).

Интересно посмотреть, как проявляется ярусность среди доминантов травяно-кустарничкового яруса и какие признаки наилучшим образом ее характеризуют. На рисунке 1 приводятся боксплоты с усредненными значениями признаков доминантных видов травяно-кустарничкового яруса волосисто-осокового липняка с елью и дубом.

Функциональные признаки листьев, такие как LA, LM и LDW, могут быть связаны с аллометрическими факторами (например, размер растения) и экологической стратегией в отношении питательного стресса и возмущений окружающей среды. Наблюдаемая картина позволяет предположить наличие четко выраженной ярусности растений по признакам листьев. В самом нижнем ярусе находится осока волосистая (LA 26 см², LM 0.26 г, LDW 90 мг) и пролесник (23 см², 0.22 г, 51 мг), чуть выше них располагается сныть (137 см², 1.5 г, 333 мг), и выше всех находится страусник, чьи площадь и масса листьев самые высокие (471 см², 5 г, 1293 мг).

Максимальная высота растения связана с формой роста, положением вида в вертикальном

Таблица 2. Средние значения признаков доминирующих видов, а также надземной биомассы травяно-кустарничкового яруса пробных площадок
 Table 2. Mean values of dominant species traits, as well as aboveground biomass of the herbaceous-shrub layer of the plotted sites

Вид Species	Признак Trait	ПП 1 Plot 1	ПП 2 Plot 2	ПП 3 Plot 3	ПП 4 Plot 4
Сныть обыкновенная <i>Aegopodium podagraria</i>	LA, см ²	154.47 ± 8.46	82.69 ± 8.24	163.45 ± 16.56	–
	LM, г	1.49 ± 0.11	0.89 ± 0.09	1.95 ± 0.25	–
	LDW, мг	306 ± 22	358 ± 28	348 ± 38	–
	SLA, см ² /г	522.03 ± 16.03	272.12 ± 35.11	488.86 ± 18.57	–
	LDMC, мг/г	208.47 ± 5.44	487.77 ± 54.95	191.98 ± 7.29	–
	h, м	0.22 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.25 ± 0.01	–
Осока волосистая <i>Carex pilosa</i>	LA, см ²	23.48 ± 1.73	27.95 ± 1.59	28.51 ± 1.97	–
	LM, г	0.19 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.25 ± 0.02	–
	LDW, мг	88 ± 8	99 ± 8	85 ± 7	–
	SLA, см ² /г	279.95 ± 16.08	327.13 ± 32.63	364.26 ± 27.18	–
	LDMC, мг/г	493.76 ± 35.09	331.56 ± 30.37	342.47 ± 21.31	–
	h, м	0.24 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.31 ± 0.01	–
Страусник обыкновенный <i>Matteuccia struthiopteris</i>	LA, см ²	582.05 ± 20.06	353.98 ± 22.13	–	477.92 ± 26.18
	LM, г	5.25 ± 0.22	5.84 ± 0.48	–	5.13 ± 0.26
	LDW, мг	1377 ± 67	1361 ± 82	–	1141 ± 71
	SLA, см ² /г	445.86 ± 29.37	303.16 ± 38.27	–	432.38 ± 19.79
	LDMC, мг/г	272.23 ± 17.05	276.47 ± 28.14	–	230.63 ± 15.41
	h, м	0.45 ± 0.02	0.47 ± 0.01	–	0.76 ± 0.04
Пролесник многолетний <i>Mercurialis perennis</i>	LA, см ²	29.01 ± 1.71	20.76 ± 0.94	24.31 ± 2.09	21.01 ± 1.45
	LM, г	0.21 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.18 ± 0.02
	LDW, мг	58 ± 4	44 ± 5	55 ± 6	47 ± 4
	SLA, см ² /г	506.04 ± 6.42	611.17 ± 72.04	500.43 ± 37.08	456.01 ± 10.47
	LDMC, мг/г	271.28 ± 7.12	195.59 ± 23.58	200.04 ± 12.19	294.49 ± 15.41
	h, м	0.31 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.33 ± 0.01
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²		35.78 ± 16.32	40.41 ± 3.12	74.84 ± 22.23	66.41 ± 18.71

Условные обозначения: LA – площадь листа; LM – масса листа; LDW – сухая масса листа; LDMC – содержание сухого вещества в листе; SLA – удельная площадь поверхности листа; h – высота растения.

Legend: LA – leaf area (cm²); LM – leaf mass(g); LDW – leaf dry weight (mg); LDMC – leaf dry matter content (mg/g); SLA – specific leaf area (cm²/g); height – plant height (m).

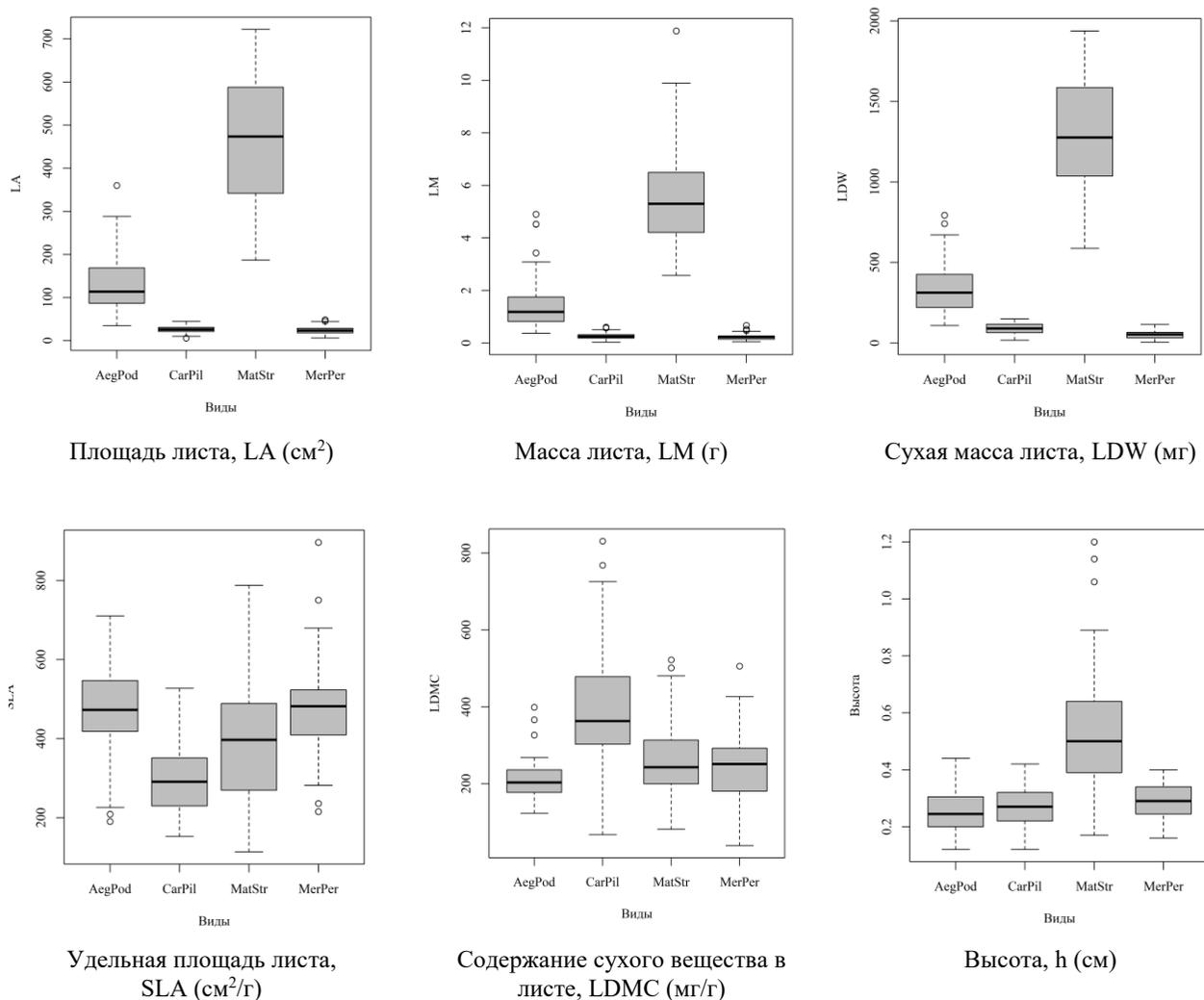


Рис. 1. Средние значения признаков доминантных видов растений травяно-кустарничкового яруса волосисто-осокового липняка с елью и дубом

Fig. 1. Mean values of traits in dominant plant species of the herbaceous-shrub layer *Carex pilosa*-*limber* forest with spruce and oak

AegPod – *Aegopodium podagraria*, *CarPil* – *Carex pilosa*, *MatStr* – *Matteuccia stuthiopteris*, *MerPer* – *Mercurialis perennis*

градиенте освещенности и его конкурентной способностью. Среди всех доминантов травяно-кустарничкового яруса страусник характеризуется наибольшей высотой (0.54 м). Остальные доминанты значительно ниже, их высоты находятся в диапазоне от 0.25 до 0.28 м. Можно предположить, что такая разница в высоте растений связана с конкуренцией за солнечный свет, тем самым прослеживается выраженная ярусная структура среди видов-доминантов травяно-кустарничкового яруса.

Ввиду того, что SLA зависит от содержания сухого вещества в листьях, LDMC может вносить вклад в SLA в зависимости от среды обитания и рассматриваемой группы растений. В травянистых растениях, произрастающих в умеренном климате, низкая SLA, как правило, связана с высоким содержанием сухого вещества в листьях.

Так, сныть, страусник и пролесник характеризуются высокими значениями SLA (427, 393 и 518 см²/г, соответственно), но низкими значениями LDMC (296, 259 и 240 мг/г, соответственно), а для осоки волосистой характерны низкие значения SLA (323 см²/г) и высокие значения LDMC (389 мг/г). Для SLA и LDMC не характерна выраженная ярусность, что объясняется участием этих признаков в процессах накопления биомассы и водно-углеродных циклах, а не конкурентной борьбой за факторы окружающей среды.

Продуктивность экосистемы, то есть скорость накопления органического вещества, определяется прежде всего наличием или отсутствием высокопродуктивных видов, а не разнообразием и взаимодополняемостью видов (Cardinale et al., 2007). Установлено, что средневзвешенные значения признаков растений, составляющих сообщества,

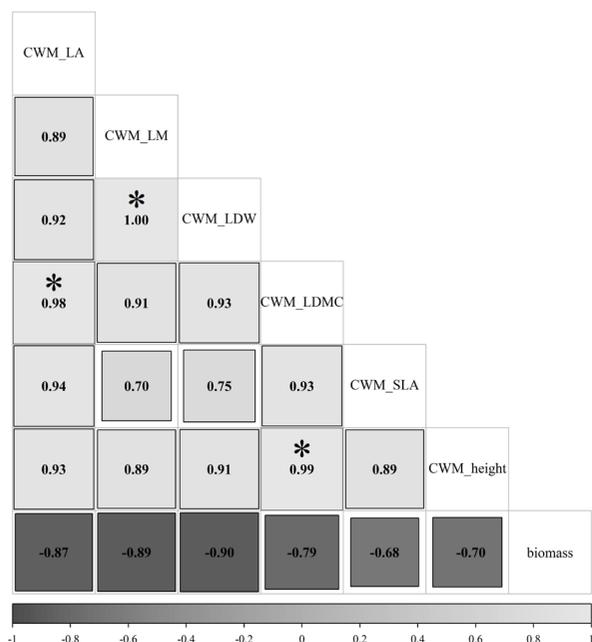


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между величиной биомассы и средневзвешенными значениями функциональных признаков

Условные обозначения: CWM – средневзвешенное среднее по сообществу; LA – площадь листа, см²; LM – масса листа, г; LDW – сухая масса листа, мг; LDMC – содержание сухого вещества в листе, мг/г; SLA – удельная площадь поверхности листа, см²/г; height – высота растения, м; biomass – биомасса, г/м²; * – статистически значимое значение. Чем меньше квадрат – тем меньше коэффициент корреляции

Fig. 2. Correlation coefficients between biomass value and community weighted mean of functional traits

Legend: CWM – community weighted mean; LA – leaf area, cm²; LM – leaf mass, g; LDW – leaf dry weight, mg; LDMC – leaf dry matter content, mg/g; SLA – specific leaf area, cm²/g; height – plant height, m; biomass – biomass, g/m²; * – statistically significant value. The smaller the square – the smaller is the correlation coefficient

коррелируют с надземной растительной биомассой (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Результаты проведенных корреляционных тестов приведены на рисунке 2.

Положительная связь между собой характерна для всех CWM функциональных признаков. Во всех случаях корреляционная связь сильная, кроме связей между SLA и сухой и CWM сырой массой. Статистически значимая связь наблюдается для следующих показателей: площадь листа и LDMC, сухая и сырая масса листа, LDMC и высота растения. Для всех взаимосвязей между биомассой и функциональными признаками характерна отрицательная, статистически не значимая связь, сильная для всех признаков, кроме SLA.

Наличие сильных положительных связей между функциональными признаками листьев и высотой растений травяно-кустарничкового яруса могут говорить о том, что лесные сообщества бо-

лее функционально структурированы. Очевидно, это является результатом длительного сосуществования многолетних видов лесного сообщества и успешной дифференциацией их экологических ниш.

Несмотря на отсутствие статистически значимых связей, мы обнаружили определенные тенденции, связанные с зависимостью биомассы от функциональных признаков. Важно отметить, что все функциональные признаки травяно-кустарничкового яруса в лесных сообществах демонстрируют сильные положительные взаимосвязи с биомассой этого яруса. Вероятно, долгосрочные взаимодействия между видами в относительно стабильных лесных сообществах, которые сильно зависят от деревьев-доминантов, способствуют формированию функциональной иерархии в этом ярусе, что, в свою очередь, сказывается на его продуктивности.

Очевидно, что функциональные характеристики видов в травяно-кустарничковом ярусе, хоть и имеющем второстепенное значение в лесных сообществах, не могут служить индикаторами продукционных процессов в этом ярусе без учета особенностей видов в древесном ярусе, которые играют важную роль в освоении ресурсов и накоплении биомассы.

Заключение

Исследованы функциональные признаки растений в травяно-кустарничковом ярусе волосисто-осокового липняка с елью и дубом в пределах карбонового полигона, расположенного в Зеленодольском районе Республики Татарстан. Анализ различий между пробными площадками выявил их значительную изменчивость.

Разные виды доминантов занимают разные ярусы в сообществе, в основном эти различия в высоте связаны с их конкурентными способностями и использованием доступного света. Это свидетельствует о длительных взаимодействиях между видами и долгосрочной совместной эволюции в лесных сообществах.

Исследована взаимосвязь между функциональными признаками растений и надземной растительной биомассой. Положительная сильная связь между собой характерна для всех CWM функциональных признаков, кроме связей между SLA, сухой и сырой массой. Для всех взаимосвязей между биомассой и функциональными признаками характерна в основном сильная отрицательная связь, что подчеркивает их влияние на продуктивность экосистемы.

Важно отметить, что функциональные характеристики растений в травяно-кустарничковом

ярус не могут быть рассмотрены изолированно от древесных видов, которые также играют ключевую роль в экосистеме. Экологическая сложность лесных экосистем требует комплексного подхода.

Таким образом, представляется возможным дальнейшая оценка функции поглощения углерода экосистемой карбонового полигона, используя связи между функциональными признаками листьев, высотой растений всех ярусов лесного сообщества и надземной биомассой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Кабинета Министров Татарстана в рамках научного проекта №22-27-20080.

Список литературы

1. Быков Б.А. Геоботаника. Алма-Ата: Наука, 1978. 287 с.
2. Дудова К.В., Атабаллыев Г.Г., Ахметжанова А.А., Гулов Д.М., Дудов С.В., Елумеева Т.Г., Кипкеев А.М., Логвиненко О.А., Семенова Р.Б., Смирнов В.Э., Текеев Д.К., Салпагаров М.С., Онипченко В.Г. Опыт изучения функционального разнообразия альпийских сообществ на примере анализа высоты растений // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80, №6. С. 439–450. doi: 10.1134/S0044459619050038.
3. Рогова Т.В., Сауткин И.С., Шайхутдинова Г.А. Проверка гипотез зависимости продуктивности растительных сообществ от видового и функционального разнообразия // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2022. Т. 164, №1. С. 76–93. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.76-93.
4. Cardinale B.J., Wright J.P., Cadotte M.W., Carroll I.T., Hector A., Srivastava D.S., Loreau M., Weis J.J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2007. Vol. 104, №46. P. 18123–18128. doi: 10.1073/pnas.0709069104.
5. Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Díaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G.A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of botany. 2003. Vol. 51. P. 335–380. doi:10.1071/BT02124.
6. Costa D.S., Gerschlauer F., Pabst H., Kuhnel A., Huwe B. Community-weighted means and functional dispersion of plant functional traits along environmental gradients on Mount Kilimanjaro // Journal of vegetation science. 2017. Vol. 28, №4. P. 684–695. doi:10.1111/jvs.12542.
7. Easlon H.M., Bloom A.J. Easy leaf area: automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area // Applications in plant sciences. 2014. Vol. 2, №7. P. 1400033.
8. Funk J.L., Cornwell W.K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function // Ecology. 2013. Vol. 94. P. 1893–1897. doi: 10.1890/12-1602.1.
9. Garnier E. Resource capture, biomass allocation and growth in herbaceous plants // Trends in ecology and evolution. 1991. Vol. 6. P. 126–131. doi: 10.1016/0169-5347(91)90091-B.
10. Garnier E., Cortez J., Billes G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // Ecology. 2004. Vol. 85, №9. P. 2630–2637. doi: 10.1890/03-0799.
11. Garnier E., Shipley B., Roumet C., Laurent G. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and

leaf dry matter content // Functional ecology. 2001. Vol. 15, №5. P. 688–695.

12. Lavorel S., Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail // Functional ecology. 2002. Vol. 16, №5. P. 545–556. doi: 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x.

13. Osada N. Height-dependent changes in shoot structure and tree allometry in relation to maximum height in four deciduous tree species // Functional ecology. 2011. Vol. 25, №4. P. 777–786. doi:10.1111/j.1365-2435.2011.01833.x.

14. Perez-Harguindeguy N., Diaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W.K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E.J., Reich P.B., Poorter L., Wright I.J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., Sack L., Blonder B., Poschod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S., Cornelissen J.H.C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of botany. 2013. Vol. 61, №3. P. 167–234. doi: 10.1071/BT12225.

15. R Core Team. R (2023): A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria // URL: <https://www.R-project.org> (дата обращения: 12.10.2023).

16. Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets Ü., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C., Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R. The worldwide leaf economics spectrum // Nature. 2004. Vol. 428. P. 821–827. doi: 10.1038/nature02403.

References

1. Bykov B.A. Geobotanika [Geobotany]. Alma-Ata: Nauka, 1978. 287 p.
2. Dudova K.V., Ataballyev G.G., Ahmetzhanova A.A., Gulov D.M., Dudov S.V., Elumeeva T.G., Kipkeev A.M., Logvinenko O.A., Semenova R.B., Sмирнов V.E., Tekeev D.K., Salpaгарov M.S., Onipchenko V.G. Opyt izuchenija funkcional'nogo raznoobrazija al'pijskih soobshhestv na primere analiza vysoty rastenij [Functional diversity of alpine plant communities: A case study of plant height] // Zhurnal obshhej biologii [Biology Bulletin Reviews]. 2019. Vol. 80, No 6. P. 439–450. doi: 10.1134/S0044459619050038.
3. Rogova T.V., Sautkin I.S., Shajhutdinova G.A. Proverka gipotez zavisimosti produktivnosti rastitel'nyh soobshhestv ot vidovogo i funkcional'nogo raznoobrazija [Testing hypotheses of plant community productivity dependence on species and functional diversity] // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Serija Estestvennyye nauki [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences]. 2022. Vol. 164, No 1. P. 76–93. doi: 10.26907/2542-064X.2022.1.76-93
4. Cardinale B.J., Wright J.P., Cadotte M.W., Carroll I.T., Hector A., Srivastava D.S., Loreau M., Weis J.J. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2007. Vol. 104, No 46. P. 18123–18128. doi: 10.1073/pnas.0709069104.
5. Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G.A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide // Australian journal of Botany. 2003. Vol. 51. P. 335–380. doi:10.1071/BT02124.

6. Costa D.S., Gerschlauber F., Pabst H., Kuhnel A., Huwe B. Community-weighted means and functional dispersion of plant functional traits along environmental gradients on Mount Kilimanjaro // *Journal of Vegetation Science*. 2017. Vol. 28, No 4. P. 684–695. doi:10.1111/jvs.12542.

7. Easlon H.M., Bloom A.J. Easy Leaf Area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area // *Applications in plant sciences*. 2014. Vol. 2, No 7. P. 1400033.

8. Funk J.L., Cornwell W.K. Leaf traits within communities: context may affect the mapping of traits to function // *Ecology*. 2013. Vol. 94. P. 1893–1897. doi: 10.1890/12-1602.1.

9. Garnier E. Resource capture, biomass allocation and growth in herbaceous plants // *Trends in ecology and evolution*. 1991. Vol. 6. P. 126–131. doi: 10.1016/0169-5347(91)90091-B.

10. Garnier E., Cortez J., Billes G., Navas M.-L., Roumet C., Debussche M., Laurent G., Blanchard A., Aubry D., Bellmann A., Neill C., Toussaint J.-P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession // *Ecology*. 2004. Vol. 85, No 9. P. 2630–2637. doi: 10.1890/03-0799.

11. Garnier E., Shipley B., Roumet C., Laurent G. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content // *Functional ecology*. 2001. Vol. 15, No 5. P. 688–695.

12. Lavorel S., Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail // *Functional ecology*. 2002. Vol. 16, No 5. P. 545–556. doi: 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x.

13. Osada N. Height-dependent changes in shoot structure and tree allometry in relation to maximum height in four deciduous tree species // *Functional ecology*. 2011. Vol. 25, No 4. P. 777–786. doi:10.1111/j.1365-2435.2011.01833.x.

14. Perez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P., Bret-Harte M.S., Cornwell W.K., Craine J.M., Gurvich D.E., Urcelay C., Veneklaas E.J., Reich P.B., Poorter L., Wright I.J., Ray P., Enrico L., Pausas J. G., de Vos A.C., Buchmann N., Funes G., Quétier F., Hodgson J.G., Thompson K., Morgan H.D., ter Steege H., Sack L., Blonder B., Poschlod P., Vaieretti M.V., Conti G., Staver A.C., Aquino S., Cornelissen J.H.C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide // *Australian journal of botany*. 2013. Vol. 61, No 3. P. 167–234. doi: 10.1071/BT12225.

15. R Core Team. R (2023): A language and environment for

statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria // URL: <https://www.R-project.org> (accessed: 12.10.2023).

16. Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F., Cavender-Bares J., Chapin T., Cornelissen J.H.C., Diemer M., Flexas J., Garnier E., Groom P.K., Gulias J., Hikosaka K., Lamont B.B., Lee T., Lee W., Lusk C., Midgley J.J., Navas M.-L., Niinemets Ü., Oleksyn J., Osada N., Poorter H., Poot P., Prior L., Pyankov V.I., Roumet C., Thomas S.C., Tjoelker M.G., Veneklaas E.J., Villar R. The worldwide leaf economics spectrum // *Nature*. 2004. Vol. 428. P. 821–827. doi: 10.1038/nature02403.

Sautkin I.S., Kutuzova A.S. Relationship between functional traits and aboveground biomass of plants forest floor in the ecosystem of the carbon polygon.

The study is devoted to the relationship between the functional traits of leaves, height and aboveground biomass of plants of the forest floor ecosystem of the carbon polygon in the Zelenodolsky district of the Republic of Tatarstan. Significant variability of plant functional traits in different studied plots was found, which might be related to environmental factors such as light, soil moisture and nutrition. The article argues that through the functional traits of dominant plant species, it is possible to characterize how they occupy the volume of their layer. The article describes positive relationships between plant functional traits and aboveground biomass, emphasizing their important influence on ecosystem productivity. It is noted that an integrated approach is needed that also takes the functional characteristics of plants of other layers, including trees.

Keywords: carbon polygon; forest ecosystems; plant functional traits; forest floor; ecosystem productivity.

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: 02.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

Сведения об авторах

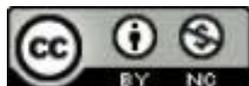
Сауткин Илья Сергеевич, кандидат биологических наук, ассистент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: sautkin.ilia@gmail.com.

Кутузова Анастасия Сергеевна, лаборант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420097, Россия, г. Казань, ул. Товарищеская, 5, E-mail: nastya.kutuzova.0234@gmail.com.

Information about the authors

Ilia S. Sautkin, PhD in Biology, Assistant, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: sautkin.ilia@gmail.com.

Anastasia S. Kutuzova, Laboratory Assistant, Kazan Federal University, 5, Tovarishcheskaya st., Kazan, 420097, Russia, E-mail: nastya.kutuzova.0234@gmail.com.



ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ *POPULUS BALSAMIFERA* L. В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО СТРЕССА

В статье приведены данные по особенностям содержания фотосинтетических пигментов и биохимических параметров листьев кроны тополя бальзамического в условиях антропогенного стресса. Выявлены особенности в динамике содержания фотосинтетических пигментов в листьях южной и северной экспозиции. Максимальное количество хлорофилла *a* выявлено в контроле, в условиях антропогенной нагрузки его количество снижается, при этом в южной экспозиции кроны дерева его содержание меньше, чем в листьях северной экспозиции. Содержание хлорофилла *b* у растений, испытывающих антропогенную нагрузку, возрастало в июне и августе, а каротиноидов в июне, июле и августе. Максимальное количество каротиноидов наблюдалось в листьях южной экспозиции в магистральных посадках. Установлена более высокая активность аскорбинатаоксидазы в листьях тополя бальзамического, произрастающего в насаждениях санитарно-защитной зоны и магистральных посадках, чем у контрольных. Достоверное возрастание активности фермента отмечалось с июня по август, независимо от экспозиции расположения листьев в кроне деревьев. В листьях тополя, произрастающего в условиях антропогенной среды, выявлено относительное накопление аскорбиновой кислоты, причем наибольшее ее количество накапливалось в листьях северной экспозиции кроны. Максимальные значения активности полифенолоксидазы наблюдали в листьях южной экспозиции кроны у тополя бальзамического, произрастающего в магистральных посадках, в июне, июле и августе. Динамика активности полифенолоксидазы и танинов в листьях северной и южной экспозиции кроны характеризовалась ростом с июня по август у растений во всех исследуемых зонах.

Ключевые слова: *Populus balsamifera* L.; антропогенный стресс; фотосинтетические пигменты; антиоксиданты; экспозиция кроны.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.30.38>

Введение

Тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L.) в урбанизированной среде представлен в насаждениях санитарно-защитных зон промышленных предприятий, жилых кварталов, в магистральных посадках. Данный вид выполняет санитарно-гигиеническую, эстетическую, защитную и средорегулирующую функции и занимает важное место в ассортиментном составе городских насаждений. Он поглощает большое количество углекислоты, образует значительные объемы кислорода (Арсентьева, 2016; Бессчетнов, 2018; Куркин, Куприянова, 2020; Ведерников, 2021; Колтунов, 2021; Гиниятуллин и др., 2022; He et al., 2021; Li et al., 2022).

Антропогенный стресс негативно сказывается на приросте диаметра ствола, способствует возникновению водного дефицита, нарушает процесс дыхания и фотосинтеза, снижает продуктивность и защитные свойства. В исследованиях проведенных Э.И. Трещевской (Трещевская и др.,

2020) показана недолговечность, низкая продуктивности тополя бальзамического в условиях техногенного стресса.

Продуктивность растений зависит от особенностей организации и функционирования фотосинтетического аппарата, в том числе от количественного содержания фотосинтетических пигментов в листе. Разнообразные стрессы абиотической и биотической природы негативно сказываются на росте и развитии растения, снижают эффективность работы фотосинтетического аппарата. Техногенные поллютанты оказывают негативное влияние на пигментный комплекс растений. Количественное содержание хлорофиллов и каротиноидов является индикатором стресса у растений (Кладько, 2018; Коротченко и др., 2020; Гиниятуллин, Кулагин, 2021; Garcia et al., 2016; Cao et al., 2020; Cisse et al., 2022).

Важную работу по защите растений от окислительного стресса выполняют вещества низкомолекулярной и высокомолекулярной природы,

относящиеся к антиоксидантам. Различные антиоксиданты растений обычно изучаются без учета особенностей их взаимодействия между собой. Таковыми являются особенности взаимодействия ферментов и вторичных метаболитов, принимающих участие в формировании адаптивных реакций растительного организма. На содержание и активность защитных метаболитов влияет комплекс факторов среды обитания, в том числе расположение листьев на южной и северной экспозиции кроны. В научной литературе отсутствуют данные по динамике содержания защитных метаболитов в листьях древесных растений южной и северной экспозиции, а также их взаимодействия по принципу фермент-вторичный метаболит. Изучение данного вопроса является актуальным и поможет расширить представления об особенностях формирования защитных реакций древесных растений на биохимическом уровне (Фуксман и др., 2005; Чупахина и др., 2012; Шубина и др., 2017; Maiti et al., 2016; Hyder et al., 2020; Huang et al., 2022; Nikerova et al., 2022).

В связи с этим целью исследований было определить особенности динамики содержания фотосинтетических пигментов и показателей биохимического состава тополя бальзамического для расширения представлений о формировании адаптивных механизмов защиты в условиях техногенной среды с учетом экспозиции кроны дерева.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в г. Набережные Челны (Республика Татарстан), который расположен на востоке Восточно-Европейской равнины. Климат в районе исследования умеренно-континентальный. Зимний период продолжительный и календарно отмечается со второй половины ноября по конец марта. Среднемесячная температура января, который является самым холодным месяцем, составляет -11.2 °С. Период с температурой ниже 0 °С – 152 дня. Весна продолжительная, с повторяющимися морозными периодами. Летний период четко выраженный, но короткий. Наблюдаются часто повторяющиеся периоды засухи. Средняя температура июля $+25.0$ °С. Почвенный покров территории представлен сочетанием урбаноземов и естественных почв (дерново-подзолистых и серых лесных) различного гранулометрического состава.

Набережные Челны – крупный промышленный, автомобильный центр Республики Татарстан. В атмосферном воздухе города систематически фиксируются высокие уровни загрязнения, индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) равен 11.6

(Государственный ..., 2021).

Объектом исследований были деревья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) возраста 40–45 лет, произрастающие в магистральных посадках (Казанский проспект и проспект Мира) и санитарно-защитной зоне (СЗЗ) ПАО «КАМАЗ». В качестве зоны условного контроля выбрано Челнинское участковое лесничество.

Отбор проб и определение количественного содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений хорошего среднегенеративного онтогенетического состояния проводили в 2020–2021 гг. в середине каждого летнего месяца (июнь, июль, август). Листья располагались в срединной формации на годичном вегетативном побеге. При отборе листьев учитывалась экспозиция, которая определялась по компасу. Листья собраны с северной и южной экспозиции кроны каждого дерева, которые имели равноценное удаление от источника загрязнения. В каждой исследуемой зоне регулярным способом было заложено по 5 пробных площадей различной конфигурации размером не менее 0.25 га. В пределах каждой площади выделяли по 10 экземпляров деревьев тополя бальзамического. Отбор листьев по всем исследуемым зонам осуществлялся в течение одного дня.

Содержание танинов в растворе определяли при помощи спектрофотометра ПЭ-5400УФ при длине волны 277 нм.

Количественное содержание аскорбиновой кислоты определяли в соответствии с ГОСТ 24556–89. Активность аскорбинатаоксидазы определяли по методу, предложенному Д.К. Асамовым и С.Т. Рахимовой, который основан на свойстве аскорбиновой кислоты поглощать свет с максимумом при длине волны 265 нм. Об активности фермента судили по уменьшению величины оптической плотности, учитывая, что степень окисления аскорбиновой кислоты пропорциональна количеству фермента. Активность полифенолоксидазы определяли спектрофотометрическим методом, основанном на измерении оптической плотности продуктов реакции, которые образуются при окислении пирокатехина за определенный промежуток времени (Ермаков и др., 1987).

Концентрацию определяемых веществ выражали в мг/г сухого вещества.

Математическую обработку результатов измерений проводили с применением статистического пакета «Statistica 10.0». Для интерпретации полученных данных использовали метод дисперсионного многофакторного анализа (при последующей оценке различий методом множественного сравнения LSD-test). В процессе сравнения

и анализа полученных результатов использовали достоверные различия между признаками (при $p < 0.05$).

Результаты и их обсуждение

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического, отобранных с северной и южной экспозиции кроны дерева представлены в таблице 1.

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание хлорофилла *a* и *b* и каротиноидов в листьях тополя достоверное влияние оказали комплекс условий произрастания, период вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

Наибольшее содержание хлорофилла *a* и *b* отмечено в июле в листьях южной экспозиции у растений, произрастающих в зоне контроля.

В условиях санитарно-защитной зоны и магистральных посадок содержание хлорофилла *a* относительно контроля достоверно снижалось, при этом минимальное его количество отмечено в листьях южной экспозиции. Так, в июне содержание хлорофилла *a* было меньше на 0.19–0.28 и 0.17–0.24 мг/г при $LSD_{05} = 0.03$ мг/г; в июле – на 0.24–0.35 и 0.36–0.51 мг/г; в августе – на 0.59–0.69 и 0.61–0.78 мг/г, соответственно, у растений в листьях северной и южной экспозиции.

По содержанию хлорофилла *b* также были выявлены специфические отличия, которые проявлялись в следующем. В июне и августе в листьях северной и южной экспозиции содержание пигмента было выше по сравнению с контролем. Листья южной экспозиции при этом содержали на 0.03–0.04 (июль) и 0.04–0.06 (август) мг/г больше хлорофилла *b* по сравнению с листьями северной экспозиции. В июле в листьях как северной, так и южной экспозиции отмечена противоположная тенденция: содержание в них хлорофилла *b* было ниже, чем в контроле.

В насаждениях СЗЗ завода и магистральных посадках количественное содержание каротиноидов было больше в июне на 0.15–0.25 и 0.17–0.19 мг/кг при $LSD_{05} = 0.03$ мг/г; в июле – на 0.05–0.09 и 0.1–0.14 мг/г; в августе – на 0.21–0.19 и 0.24–0.31 мг/г, соответственно, в северной и южной экспозиции.

Следует отметить факт большего содержания хлорофилла *b* в листьях южной экспозиции в августе по сравнению с северной экспозицией, превышение составляло: в зоне условного контроля 0.07 мг/г, в СЗЗ – 0.04 мг/г, в магистральных насаждениях – 0.06 мг/г. В листьях южной экспозиции магистральных насаждений содержание каротиноидов было выше, чем в листьях северной

экспозиции.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического зависит от периода вегетации, жизненного состояния особей, при этом адаксиальная и абаксиальная стороны листьев на содержание пигментов не влияют (Гиниятуллин и др., 2022).

Анализируя динамику содержания исследуемых фотосинтетических пигментов в листьях тополя бальзамического разной экспозиции в каждой зоне произрастания следует отметить общую тенденцию к возрастанию содержания хлорофилла *a* и *b* в июле и снижению в августе.

Результаты исследований содержания фотосинтетических пигментов в листьях свидетельствуют об адаптивных возможностях конкретного вида растения к условиям антропогенного стресса. Так, например, у ели европейской в городских условиях содержание хлорофилла *a* ниже, чем у ели колючей, что является важным показателем стабильности вида (Бухарина, Пашкова, 2015).

Многие исследования указывают на взаимосвязь адаптивных возможностей растительного организма и функционирования ферментативной системы, в том числе медьсодержащих ферментов полифенолоксидазы и аскорбинатоксидазы. Эти ферменты в сочетании с фенольными субстратами участвуют в процессе дыхания. В поврежденных тканях растений, при воздействии низких температур активность полифенолоксидазы возрастает. Техногенное загрязнение окружающей среды приводит к возрастанию активности данного фермента. Кроме того, полифенолоксидаза принимает участие в регуляции метаболизма в ходе онтогенеза и приспособительных реакциях к негативным факторам окружающей среды (Skrypnik et al., 2021).

В работе были определены низкомолекулярные и высокомолекулярные биохимические показатели, участвующие в функционировании антиоксидантной системы защиты.

В результате проведенного дисперсионного многофакторного анализа результатов исследования была отмечена достоверность влияния комплекса условий места произрастания, сроков вегетации, экспозиции расположения листьев и взаимодействия этих факторов на активность аскорбинатоксидазы в листьях тополя бальзамического ($p < 0.001$).

В ходе исследования была установлена более высокая активность аскорбинатоксидазы за весь анализируемый период в листьях южной и северной экспозиции тополя бальзамического, произрастающего в насаждениях СЗЗ и магистральных посадках, чем у контрольных деревьев (табл. 2).

Таблица 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Populus balsamifera* в различных типах насаждений с учетом экспозиции кроны дерева
 Table 1. The content of photosynthetic pigments in the leaves of *Populus balsamifera* in various types of plantations, taking into account the exposure of the tree crown

Месяц (Фактор B) Month (Factor B)	Экспозиция (Фактор C) Exposition (Factor C)	Показатели Indicators		
		Хлорофилл <i>a</i> , мг/г Chlorophyll <i>a</i> , mg/g LS- D _{05ABC} =0.03	Хлорофилл <i>b</i> , мг/г Chlorophyll <i>b</i> , mg/g LSD _{05ABC} =0.03	Каротиноиды, мг/г Carotenoids, mg/g LSD _{05ABC} =0.02
Зона условного контроля (Фактор A) Zone of conditional control (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.43	1.22	0.68
	южная southern	1.45	1.11	0.69
Июль July	северная northern	2.15	2.32	0.93
	южная southern	2.19	2.29	0.97
Август August	северная northern	1.83	1.85	1.01
	южная southern	1.85	1.92	1.02
Санитарно-защитная зона промышленного предприятия (Фактор A) Sanitary protection zone of the industrial enterprises (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.24	1.32	0.83
	южная southern	1.18	1.35	0.94
Июль July	северная northern	1.91	2.26	0.98
	южная southern	1.84	2.21	1.06
Август August	северная northern	1.24	2.05	1.22
	южная southern	1.16	2.09	1.21
Магистральные посадки (Фактор A) Street plants (Factor A)				
Июнь June	северная northern	1.26	1.34	0.85
	южная southern	1.21	1.38	0.88
Июль July	северная northern	1.79	2.28	1.03
	южная southern	1.68	2.22	1.11
Август August	северная northern	1.18	2.06	1.25
	южная southern	1.07	2.12	1.33

При этом в листьях южной экспозиции активность фермента была ниже, чем в листьях северной экспозиции. Динамика активности аскорбинатоксидазы была схожей у растений в разных зонах произрастания. Отмечалось достоверное существенное возрастание активности фермента с июня по август, независимо от экспозиции расположения листьев в кроне деревьев.

Аскорбинатоксидаза принимает участие в ме-

таболизме аскорбиновой кислоты. Была определена корреляционная взаимосвязь между уровнем активности аскорбинатоксидазы и количественным содержанием аскорбиновой кислоты в листьях тополя бальзамического, которая составила -0.87 при $p < 0.014$.

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание аскорбиновой кислоты в листьях тополя достоверное влияние оказали

Таблица 2. Биохимические показатели листьев *Populus balsamifera* в различных типах насаждений с учетом экспозиции кроны дерева
 Table 2. Biochemical parameters of the *Populus balsamifera* leaf in various types of plantations, taking into account the exposure of the tree crown

Месяц (Фактор В) Month (Factor B)	Экспозиция (Фактор С) Exposition (Factor C)	Показатели Indicators			
		АО, ед. акт. AO, un. act. LSD _{05ABC} =0.04	АК, мг/% AA, mg/% LSD _{05ABC} =8.6	ПФО, ед. акт. PPO, un. act. LSD _{05ABC} =0.04	Танины, мг/г Tannins, mg/g LSD _{05ABC} =0.05
Зона условного контроля (Фактор А) Zone of conditional control (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.56	356.2	1.92	3.81
	южная southern	2.45	346.2	1.91	3.85
Июль July	северная northern	3.83	223.1	4.18	5.06
	южная southern	3.75	216.7	4.16	5.13
Август August	северная northern	4.11	138.2	5.14	6.74
	южная southern	4.13	135.4	5.16	6.91
Санитарно-защитная зона промышленного предприятия (Фактор А) Sanitary protection zone of the industrial enterprises (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.85	397.2	1.92	3.88
	южная southern	2.72	383.2	2.03	3.96
Июль July	северная northern	4.23	243.1	4.29	5.65
	южная southern	4.04	228.3	4.69	5.73
Август August	северная northern	4.42	205.3	5.36	7.04
	южная southern	4.25	183.1	5.54	7.12
Магистральные посадки (Фактор А) Street plants (Factor A)					
Июнь June	северная northern	2.95	423.1	2.72	3.89
	южная southern	2.82	418.2	2.83	3.96
Июль July	северная northern	3.99	415.4	5.54	5.92
	южная southern	3.82	392.1	5.61	6.01
Август August	северная northern	4.23	178.6	7.21	7.26
	южная southern	4.12	164.2	7.39	7.34

Примечание: АО – аскорбинатоксидаза; АК – аскорбиновая кислота; ПФО – полифенолоксидаза.
 Note: AO – ascorbate oxidase; AA – ascorbic acid; PPO – polyphenol oxidase.

комплекс условий места произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

Независимо от зоны произрастания, периода вегетации и экспозиции расположения листьев в кроне дерева в насаждениях санитарно-защитных зон промышленных предприятий и в магистральных посадках синтезировалось большее количество аскорбиновой кислоты в листьях, чем у растений в контроле. За весь период вегетации и во всех зонах больше аскорбиновой кислоты накапливалось в листьях северной экспозиции кроны.

Рассматривая динамику накопления аскорбиновой кислоты, можно сказать, что ее количество уменьшается с июня по август во всех исследуемых зонах как в северной, так и в южной экспозиции кроны.

Полифенолоксидаза является медьсодержащим ферментом, который катализирует окисление гидроксильной группы фенольных соединений с образованием хинонов. Активность полифенолоксидазы отражает устойчивость растений к действию абиотических, биотических и антропогенных факторов.

Проведенный дисперсионный многофакторный анализ выявил, что на активность полифенолоксидазы в листьях тополя бальзамического достоверное влияние оказали комплекс условий места произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

В насаждениях СЗЗ в июле и августе активность полифенолоксидазы в листьях тополя была выше, чем в контроле: в июле на 0.11 и 0.53 ед. акт.; в августе – на 0.22 и 0.38, при $LSD_{05} = 0.04$ ед. акт., соответственно, в северной и южной экспозиции. При этом в листьях северной экспозиции кроны дерева активность была ниже, чем в листьях южной экспозиции кроны. Максимальные значения активности полифенолоксидазы наблюдали в листьях южной экспозиции кроны у тополя, произрастающего в магистральных посадках, в июне, июле и августе. Динамика активности полифенолоксидазы в листьях северной и южной экспозиции кроны характеризовалась ростом с июня по август у растений во всех исследуемых зонах (табл. 2).

В адаптивных реакциях древесных растений принимают участие разнообразные метаболиты, в том числе фенольные соединения, представителями которых являются танины. Они влияют на процессы роста и развития, а также принимают участие в адаптации растения к стрессовым факторам. Механизм их действия на рост растений не ясен, часто его связывают с воздействием на ауксиновый обмен, посредством регуляции количества ауксинов. Фенольные вещества участвуют в транспорте электронов при дыхании и фотосинтезе, в биосинтезе лигнина, обеспечивают неферментативное окисление ряда соединений (аминокислот, аскорбиновой кислоты, цитохромов и т.д.). Цитологические исследования хвои ели и сосны, произрастающих в промышленных зонах, выявили накопление фенольных соединений в тканях хвои. В хвое деревьев, пораженных грибными болезнями, содержание фенолов увеличивается, изменяется и их качественный состав. Обсуждается возможная роль фенольных соединений, в том числе танинов, в качестве защиты для жизнеспособных тканей, а также их участие в процессе старения (Kernaghan et al., 2022).

Полифенолоксидаза принимает участие в метаболизме танинов. Коэффициент корреляции между уровнем активности полифенолоксидазы и количественным содержанием танинов в листьях тополя был равен 0.96 ($p < 0.0001$).

Дисперсионный многофакторный анализ показал, что на содержание танинов в листьях достоверное влияние оказали комплекс условий ме-

ста произрастания, фазы вегетации, экспозиция расположения листьев и взаимодействие этих факторов ($p < 0.001$).

В насаждениях СЗЗ и магистральных посадках содержание танинов в листьях северной и южной экспозиции кроны было выше, чем в контроле, за весь период вегетации. В зонах с техногенной нагрузкой в листьях южной экспозиции кроны наблюдалось большее количество танинов, чем в листьях северной экспозиции. Максимальное их количество отмечено в августе у растений, произрастающих в магистральных посадках. Во всех обследуемых зонах динамика накопления танинов была сходной: наблюдалось их увеличение с июня по август.

Заключение

В листьях тополя бальзамического, произрастающего в условиях техногенной нагрузки (техногенного стресса), отмечается достоверное снижение содержания хлорофилла *a*, особенно в листьях южной экспозиции. Содержание хлорофилла *b* в июне и августе, а каротиноидов в течение всего летнего периода, было выше, чем в контроле. Данная картина отражает специфическую реакцию тополя бальзамического на комплекс негативных условий среды. Кроме того, были выявлены отличия между экспозициями кроны дерева: при северной экспозиции кроны наблюдали большее содержание хлорофилла *a*, тогда как содержание хлорофилла *b* и каротиноидов было меньше.

Показана взаимосвязь между вторичным метаболитом и ферментом, участвующем в его синтезе. Ближе к концу сезонной вегетации (август) отмечается увеличение активности аскорбинатоксидазы, при этом содержание аскорбиновой кислоты в листьях снижается. Активность полифенолоксидазы и содержание танинов в листьях тополя бальзамического возрастает к августу.

Работа выполнена по теме государственного задания №FNFE-2021-0001 «Научные основы и технологии обогащения дендрофлоры лесомелиоративных комплексов хозяйственно ценными древесными и кустарниковыми растениями в целях предотвращения деградации и опустынивания территорий» (Рег. номер 121041200197-8), финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Арсентьева А.А. Рост тополя бальзамического в условиях автотранспортного загрязнения (на примере г. Красноярска) // Уральский научный вестник. 2016. №4(2). С. 37–45.
2. Бессчетнов П.В. Морфометрические характеристики листьев тополей в условиях городских посадок Нижнего

Новгорода // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. №4. С. 17–27.

3. Бухарина И.Л., Пашкова А.С. Особенности динамики фотосинтетических пигментов у хвойных растений в насаждениях города // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. №1. С. 27–33.

4. Ведерников К.Е. Изменение химического состава древесины *Pecea obovata* Ledeb. под воздействием *Ips tyrographus* L. // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 251–258. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2021048466>.

5. Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.Ю. Состояние и водный дефицит листьев тополя бальзамического в условиях полиметаллического загрязнения Стерлитамакского промышленного центра // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. №3. С. 5–10. doi: 10.31040/2222-8349-2021-0-3-5-10.

6. Гиниятуллин Р.Х., Иванов Р.С., Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях «здоровых» и «ослабленных» деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), произрастающих в условиях промышленного загрязнения (Республика Башкортостан, Стерлитамакский промышленный центр) // Самарский научный вестник. 2022. №11. С. 43–48. doi: 10.55355/snvt2022111104.

7. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году». Казань, 2021. 412 с.

8. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.

9. Кладько Ю.В. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки Г. Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2018. №4. С. 49–57. doi: 10.15372/SJFS20180406.

10. Колтунов Е.В. Влияние стволовой гнили на фенольные соединения в листьях тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в условиях урбанизации // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 155–161. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2021028246>.

11. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г., Кондратюк Т.А., Медведева Т.А. Влияние выбросов тепловых электростанций Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического // Успехи современного естествознания. 2020. №10. С. 85–90. doi: 10.17513/use.37495.

12. Куркин В. А., Куприянова Е. А. Сравнительное исследование флавоноидного состава листьев фармакопейных видов рода *Populus* // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 117–124. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2020015818>.

13. Трещевская Э.И., Голядкина И.В., Трещевская С.В., Князев В.И., Кушнир Е.А. Перспективы лесной рекультивации техногенных ландшафтов с помощью культур тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, №2. С. 81–92. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/8.

14. Фуксман И.Л., Новицкая Л.Л., Исидоров В.А., Рошин В.И. Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса // Лесоведение. 2005. №3. С. 4–10.

15. Чупахина Г. Н., Масленикова П. В., Скрыпник Л. Н., Бессережнова М. И. Реакция пигментной и антиоксидантной системы растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. №2. С. 171–185.

16. Шубина А.Г., Синютина С.Е., Попова (Бирюкова) Е.Д. Активность полифенолоксидазы в хвое ели голубой (*Picea pungens*) и картофеля (*Solanum tuberosum*) как флориндикационный маркер состояния окружающей среды // Вестник ТГУ. 2017. Т. 17, вып. 1. С. 347–348.

17. Garcia D.E., Glasser W.G., Pizzi A., Paczkowski S.P., Laborie M.P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering // New journal of chemistry. 2016. №1. P. 234–242. doi: 10.1039/C5NJ02131F.

18. Maiti R., Rodriguez H.G., Sarkar N.C., Kumari A. Biodiversity in leaf chemistry (pigments, epicuticular wax and leaf nutrients) in woody plant species in North–eastern Mexico, a Synthesis // Forest Research. 2016. №5. P. 170–176. doi: 10.4172/2168–9776.1000170.

19. Hyder P.W., Fredrickson E.L., Estell R.E., Tellez M., Gibbens R.P. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*) // Biochemical systematics and ecology. 2020. №30. P. 905–912. doi:10.1016/S0305–1978(02)00050–9.

20. Kernaghan G., Griffin A., Gailey J., Hussain A. Tannin tolerance and resistance in dark septate endophytes // Rhizosphere. 2022. №23. 100574. doi: 10.1016/j.rhisph.2022.100574.

21. Nikerova K.M., Galibina N.A., Moshchenskaya Y.L., Tarelkina T.V., Borodina M.N., Sofronova I.N., Semenova L.I., Ivanova D.S., Novitskaya L.L. Upregulation of antioxidant enzymes is a biochemical indicator of abnormal xylogenesis in Karelian birch // Trees. Structure and function. 2022. №36 (2). P. 517–529. doi: 10.1007/s00468–021–02225–5.

22. He F., Shi Y.-J., Zhao Q., Zhao K.-J., Cui X.-L., Chen L.-H., Yang H.-B., Zhang F., Mi J.-X., Huang J.-L., Wan X.-Q. Genome-wide investigation and expression profiling of polyphenol oxidase (PPO) family genes uncover likely functions in organ development and stress responses in *Populus trichocarpa* // BMC Genomics. 2021. №22. 731. doi: 10.1186/s12864–021–08028–9.

23. Cao Y., Ma C., Chen H., Chen G., White J. C., Xing B. Copper stress in flooded soil: Impact on enzyme activities, microbial community composition and diversity in the rhizosphere of *Salix integra* // Science of the total environment. 2020. 704. 135350. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135350.

24. Cisse E.-H.M., Zhang L.-J., Pu Y.-J., Miao L.-F., Li D.-D., Zhang J., Yang F. Exogenous Ca²⁺ Associated with melatonin alleviates drought-induced damage in the woody tree *Dalbergia odorifera* // Journal of plant growth regulation. 2022. №41 (6). P. 2359–2374. doi: 10.1007/s00344–021–10449–5.

25. Huang R., Li C., Guo M., Xu H., Zhang S., Wang M., Ge Y. Caffeic acid regulated respiration, ethylene and reactive oxygen species metabolism to suppress senescence of *Malus domestica* // Postharvest biology and technology. 2022. №194. 112074. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112074.

26. Li C., Li J., Du X., Zhang J., Zou Y., Liu Y., Li Y., Lin H., Li H., Liu D., Lu H. Chloroplast thylakoidal ascorbate peroxidase, PtotAPX, has enhanced resistance to oxidative stress in *Populus tomentosa* // International journal of molecular sciences. 2022. №23 (6). 3340. doi:10.3390/ijms23063340.

27. Skrypnik L., Maslennikov P., Feduraev P., Pungin A., Belov N. Changes in antioxidative compounds and enzymes in small-leaved linden (*Tilia cordata* mill.) in response to mistletoe (*Viscum album* L.) infestation // Plants. 2021. №10 (9). 1871. doi: 10.3390/plants10091871.

References

1. Arsent'yeva A. Rost topolya bal'zamicheskogo v usloviyakh avtotransportnogo zagryazneniya (na primere g. Krasnoyarska) [Growth of balsamic poplar under conditions of road pollution (on the example of Krasnoyarsk)] // Ural'skiy nauchnyy vestnik [Ural scientific bulletin]. 2016. No 4 (2). P. 37–45.

2. Besschetnov P.V. Morfometricheskiye kharakteristiki list'ev topoley v usloviyakh gorodskikh posadok Nizhnego Novgoroda [Morphometric characteristics of poplar leaves in the conditions of urban plantings in Nizhny Novgorod] // Vestnik

Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Nizhny Novgorod state agricultural academy]. 2018. No 4(20). P. 17–27.

3. Bukharina I.L., Pashkova A.S. Osobennosti dinamiki fotosinteticheskikh pigmentov u khvoynykh rasteniy v nasazhdeniyakh goroda [Features of the dynamics of photosynthetic pigments in coniferous plants in city plantings] // Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Izhevsk state agricultural academy]. 2015. No 1. P. 27–33.

4. Vedernikov K.Ye. Izmeneniye khimicheskogo sostava drevesiny Pecea obovata Ledeb. pod vozdeystviyem Ips typographus L. [Changes in the chemical composition of Pecea obovata Ledeb wood. under the influence of Ips typographus L.] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2021. No 4. P. 251–258. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021048466>.

5. Giniyatullin R.Kh., Kulagin A.Yu. Sostoyaniye i vodnyy defitsit list'yev topolya bal'zamicheskogo v usloviyakh polimetallicheskogo zagryazneniya Sterlitamakskogo promyshlennogo tsentra [Status and water deficiency of balsam poplar leaves under conditions of polymetallic pollution of the Sterlitamak industrial center] // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN [News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 3. P. 5–10. doi: 10.31040/2222-8349-2021-0-3-5-10.

6. Giniyatullin R.Kh., Ivanov R.S., Tagirova O.V., Kulagin A.YU. Soderzhaniye fotosinteticheskikh pigmentov v list'yakh «zdorovykh» i «oslablennykh» derev'yev topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.), proizrastayushchikh v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya (Respublika Bashkortostan, Sterlitamakskiy promyshlennyy tsentr) [The content of photosynthetic pigments in the leaves of «healthy» and «weakened» balsam poplar trees (*Populus balsamifera* L.) growing in conditions of industrial pollution (Republic of Bashkortostan, Sterlitamak industrial center)] // Samarskiy nauchnyy vestnik [Samara Scientific Bulletin]. 2022. No 11 (1). P. 43–48. doi: 10.55355/snv2022111104.

7. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii prirodnykh resursov i ob okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Tatarstan v 2020 godu». [On the state of natural resources and environmental protection of the Republic of Tatarstan in 2020]. Kazan, 2021. 412 p.

8. Yermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. et al. Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad: Agropromizdat, 1987. 429 p.

9. Klad'ko Yu. V. Radial'nyy rost drevesnykh vidov v usloviyakh vysokoy antropogennoy nagruzki G. Krasnoyarska [Radial growth of tree species under conditions of high anthropogenic load in Krasnoyarsk] // Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian forest journal]. 2018. No 4. P. 49–57. doi: 10.15372/SJFS20180406.

10. Koltunov Ye.V. Vliyaniye stolovoy gnili na fenol'nyye soyedineniya v list'yakh topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) v usloviyakh urbanizatsii [Effect of stem rot on phenolic compounds in the leaves of balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) under urbanization] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2021. No 2. P. 155–161. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028246>.

11. Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., Kondratyuk T.A., Medvedeva T.A. Vliyaniye vybrosov teplovykh elektrostantsiy Krasnoyarskogo kraya na stabil'nost' razvitiya topolya bal'zamicheskogo [The impact of emissions from thermal power plants of the Krasnoyarsk Territory on the stability of the development of balsam poplar] // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances of modern natural science]. 2020. No 10. P. 85–90. doi: 10.17513/use.37495.

12. Kurkin V.A., Kupriyanova Ye.A. Sravnitel'noye issledovaniye flavonoidnogo sostava list'yev farmakopeynykh vidov

roda Populus. [Comparative study of the flavonoid composition of leaves of pharmacopoeial species of the genus Populus] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant materials]. 2020. No 1. P. 117–124. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015818>.

13. Treshchevskaya E.I., Golyadkina I.V., Treshchevskaya S.V., Knyazev V.I., Kushnir E.A. Perspektivy lesnoy rekultivatsii tekhnogennykh landshaftov s pomoshch'yu kul'tur topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) [Prospects for forest reclamation of technogenic landscapes using balsam poplar (*Populus balsamifera* L.) crops] // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry journal]. 2020. Vol. 10, No 2. P. 81–92. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/8.

14. Fuksman I.L., Novitskaya L.L., Isidorov V.A., Roshchin V.I. Fenol'nyye soyedineniya khvoynykh derev'yev v usloviyakh stressa [Phenolic compounds of coniferous trees under stress conditions] // Lesovedeniye [Forestry]. 2005. No 3. P. 4–10.

15. Chupakhina G.N., Maslennikova P.V., Skrypnik L.N., Besserezhnova M.I. Reaktsiya pigmentnoy i antioksidantnoy sistemy rasteniy na zagryazneniye okruzhayushchey sredy g. Kaliningrada vybrosami avtotransporta [The reaction of the pigment and antioxidant system of plants to environmental pollution in Kaliningrad by vehicle emissions] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2012. No 2. P. 171–185.

16. Shubina A.G., Sinyutina S.Ye., Popova (Biryukova) Ye.D. Aktivnost' polifenoloksidazy v khvoye yeli goluboy (*Picea pungens*) i kartofele (*Solanum tuberosum*) kak fiotindikatsionnyy marker sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Polyphenol oxidase activity in the needles of blue spruce (*Picea pungens*) and potatoes (*Solanum tuberosum*) as a phytindicative marker of environmental conditions] // Vestnik TGU. 2017. Vol. 17, iss. 1. P. 347–348.

17. Garcia D.E., Glasser W.G., Pizzi A., Paczkowski S.P., Laborie M.P. Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering // New journal of chemistry. 2016. No 1. P. 234–242. doi: 10.1039/C5NJ02131F.

18. Maiti R., Rodriguez H.G., Sarkar N.C., Kumari A. Biodiversity in leaf chemistry (pigments, epicuticular wax and leaf nutrients) in woody plant species in North–eastern Mexico, a Synthesis // Forest Research. 2016. No 5. P. 170–176. doi: 10.4172/2168–9776.1000170.

19. Hyder P.W., Fredrickson E.L., Estell R.E., Tellez M., Gibbens R.P. Distribution and concentration of total phenolics, condensed tannins, and nordihydroguaiaretic acid (NDGA) in creosotebush (*Larrea tridentata*) // Biochemical Systematics and Ecology. 2020. No 30. P. 905–912. doi:10.1016/S0305–1978(02)00050–9.

20. Kernaghan G., Griffin A., Gailey J., Hussain A. Tannin tolerance and resistance in dark septate endophytes // Rhizosphere. 2022. No 23. 100574. doi: 10.1016/j.rhisph.2022.100574.

21. Nikerova K.M., Galibina N.A., Moshchenskaya Y.L., Tarelkina T.V., Borodina M.N., Sofronova I.N., Semenova L.I., Ivanova D.S., Novitskaya L.L. Upregulation of antioxidant enzymes is a biochemical indicator of abnormal xylogenesis in Karelian birch // Trees. Structure and function. 2022. No 36 (2). P. 517–529. doi: 10.1007/s00468–021–02225–5.

22. He F., Shi Y.-J., Zhao Q., Zhao K.-J., Cui X.-L., Chen L.-H., Yang H.-B., Zhang F., Mi J.-X., Huang J.-L., Wan X.-Q. Genome-wide investigation and expression profiling of polyphenol oxidase (PPO) family genes uncover likely functions in organ development and stress responses in *Populus trichocarpa* // BMC Genomics. 2021. No 22. 731. doi: 10.1186/s12864–021–08028–9.

23. Cao Y., Ma C., Chen H., Chen G., White J. C., Xing B. Copper stress in flooded soil: Impact on enzyme activities, microbial community composition and diversity in the rhizosphere of *Salix integra* // Science of the total environment. 2020. 704. 135350. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135350

24. Cisse E.-H.M., Zhang L.-J., Pu Y.-J., Miao L.-F., Li D.-D., Zhang J., Yang F. Exogenous Ca²⁺ Associated with melatonin alleviates drought-induced damage in the woody tree *Dalbergia odorifera* // Journal of plant growth regulation. 2022. No 41 (6). P. 2359–2374. doi: 10.1007/s00344-021-10449-5.

25. Huang R., Li C., Guo M., Xu H., Zhang S., Wang M., Ge Y. Caffeic acid regulated respiration, ethylene and reactive oxygen species metabolism to suppress senescence of *Malus domestica* // Postharvest biology and technology. 2022. No 194. 112074. doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112074.

26. Li C., Li J., Du X., Zhang J., Zou Y., Liu Y., Li Y., Lin H., Li H., Liu D., Lu H. Chloroplast thylakoidal ascorbate peroxidase, PtotAPX, has enhanced resistance to oxidative stress in *Populus tomentosa* // International journal of molecular sciences. 2022. No 23 (6). 3340. doi:10.3390/ijms23063340.

27. Skrypnik L., Maslennikov P., Feduraev P., Pungin A., Belov N. Changes in antioxidative compounds and enzymes in small-leaved linden (*Tilia cordata* mill.) in response to mistletoe (*Viscum album* L.) infestation // Plants. 2021. No 10 (9). 1871. doi: 10.3390/plants10091871.

Kuzmin P.A. Investigation of physiological and biochemical features of *Populus balsamifera* l. under conditions of anthropogenic stress.

The article presents data on the content of photosynthetic pigments and biochemical parameters of southern and northern exposure leaves in balsam poplar crown under anthropogenic stress. We revealed peculiarities in the dynamics of the content of photosynthetic pigments in leaves of different exposures. The maximum amount of chlorophyll was in the control zone; under conditions of anthropogenic stress, its amount decreased, while its content in the southern exposure of the tree crown was lower than

in the leaves of the northern exposure. The content of chlorophyll b in plants of anthropogenic environment increased in June and August, and carotenoids in June, July and August. The maximum number of carotenoids was in leaves of southern exposure in the main plantings. A higher activity of ascorbate oxidase was established for the entire analyzed period in the leaves of the southern and northern exposures of balsam poplar growing in plantations of the SPZ and main plantings than in control individuals. At the same time, the activity in the leaves of the southern exposure was lower than in the leaves of the northern exposure. A significant increase in enzyme activity was noted from June to August, regardless of the exposure of leaves in the tree crown. Under the conditions of the anthropogenic environment in plants, a greater amount of ascorbic acid was found in the leaves than in plants in the control. At the same time, in all zones, more ascorbic acid accumulated in the leaves of the northern exposure in balsam poplar crown. The maximum values of polyphenol oxidase activity were in the leaves of the southern exposure of the crown in balsam poplar growing in the main plantings in June, July and August. The dynamics of the activity of polyphenol oxidase and tannins in the leaves of the northern and southern exposure of the crown was characterized by growth from June to August in plants in all studied zones.

Keywords: *Populus balsamifera* L.; anthropogenic stress; chlorophyll; carotenoids; ascorbate oxidase activity; polyphenol oxidase activity; tannins; ascorbic acid; crown exposure.

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: 03.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.11.2023

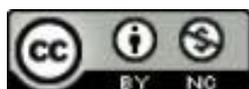
Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

Сведения об авторах

Кузьмин Петр Анатольевич, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 400062, Россия, г. Волгоград, Университетский пр., 97, E-mail: kuzmin-p@vfanc.ru.

Information about the authors

Petr A. Kuzmin, Ph.D. of Agriculture, Head of the Laboratory, Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, 97, Universitetsky av., Volgograd, 400062, Russia, E-mail: kuzmin-p@vfanc.ru.



^{1,2}В.З. Латыпова, ¹Н.Ю. Степанова, ³Т.А. Кондратьева, ¹О.В. Никитин

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, step090660@yandex.ru

²Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

³Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РТ

МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В РАЙОНЕ ВОДНОГО УЧАСТКА ПОЛИГОНА «КАРБОН – ПОВОЛЖЬЕ»

В рамках создания паспорта водного участка полигона «Карбон – Поволжье» охарактеризовано гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод Куйбышевского водохранилища в акватории Саралинского участка ВКГПБЗ. Сезонная динамика основных показателей района исследования обнаруживает стабильное состояние гидрохимического режима на протяжении 2018–2023 гг. Вода в разные годы и сезоны характеризовалась превышением ПДК_{рх} по азоту аммонийному и нитритному, а также по фосфору фосфатов. Сравнение гидрохимических и гидробиологических показателей воды методом непараметрической статистики по критерию Манна-Уитни показало значимое отличие по цветности, ионам азотной группы, фосфору фосфатов, а также численности и биомассе фитопланктона, численности коловраток Саралинского участка от открытых участков акватории Куйбышевского водохранилища. Анализ статистических характеристик развития фитопланктона на открытых участках водохранилища выявил, наряду с мезотрофным состоянием экосистем в целом, также протекание процессов эвтрофирования, вызывающих элементы экологического регресса. Трофический статус Саралинского водного участка оценен как мезотрофный и имеет тенденцию к дальнейшему эвтрофированию. Оценка инвариантного состояния водных экосистем по уровню развития зоопланктона показала наличие антропогенного напряжения с элементами экологического регресса, а по уровню развития зообентоса – элементы экологического регресса. По уровню развития олигохет инвариантное состояние оценивается как испытывающее антропогенное напряжение.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище; полигон «Карбон – Поволжье»; поверхностные воды; качество воды по гидрохимическим и гидробиологическим показателям; мониторинг.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49>

Введение

Карбоновый полигон – один или несколько участков земной поверхности, на территории которых реализуется комплекс мероприятий, направленных на контроль баланса климатически активных газов природных экосистем. В 2021 г. в перечень карбоновых полигонов Российской Федерации, участвующих в реализации пилотного проекта, был включен карбоновый полигон «Карбон – Поволжье» в Республике Татарстан при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (КФУ) (Приказ ..., 2021) с водным участком в акватории Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

Участок «Саралы» расположен на территории Лаишевского муниципального района Республики Татарстан, выдвинутого в Волжско-Камский плёс Куйбышевского водохранилища (КВ), в отдалении от крупных населенных пунктов (Ни-

китин и др., 2022). В рамках создания паспорта водного участка карбонового полигона стояла задача охарактеризовать экологическое состояние вод Куйбышевского водохранилища в районе Волжско-Камского плеса и акватории Саралинского участка ВКГПБЗ.

Целью работы явилась сравнительная характеристика гидрохимического и гидробиологического состояния поверхностных вод Куйбышевского водохранилища и водного участка полигона «Карбон – Поволжье» (участок «Саралы»).

Материалы и методы исследования

Пробы поверхностной воды отбирали в мае, июле и октябре в течение 2018–2023 гг. на участках, не подверженных сильному антропогенному воздействию и максимально приближенных к Саралинскому участку ВКГПБЗ (Лаишево, Тенишево, Заовражные Каратаи – станции регулярного мониторинга поверхностных вод), а также в ак-

ватории Саралинского участка ВКГПБЗ в вегетационный период (ежемесячно с мая по октябрь).

Участки мониторинга располагаются в акватории Волжско-Камского плеса Куйбышевского водохранилища. Глубины в районе исследований варьируют от 3 до 16 м.

Карта-схема расположения станций мониторинга приведена на рисунке 1.

Химико-аналитические исследования поверхностных вод были выполнены по стандартным методикам и включали определение рН, жесткости, минерализации, содержания растворенного кислорода, кальция, магния, азота аммонийного, нитритного, нитратного, хлоридов, сульфатов, фосфора фосфатов, железа общего, алюминия.

Отбор и обработка гидробиологических проб осуществлялась в соответствии с методикой (Руководство ..., 1992). Трофический статус оценивали по трофическому индексу Милиуса ITS (Милиус и др., 1987). Оценку инвариантного состояния водных экосистем (РД 52.24.564–96, РД 52.24.620–2000) проводили по следующим показателям: мода модального интервала общей численности фитопланктона (M_{oc}); мода модального интервала относительной численности доминирующего вида (M_{od}); мода модального интервала общего числа видов (M_{ov}); Π_o – плотность

вариационного ряда ($\Pi_o = w/k$, где w – частота или доля того или иного интервала в сумме всех частот, %; k – величина интервала); α_1 – частота обнаружения высоких значений численности фитопланктона ($\alpha_1 = n_j/n_j \cdot 100$; где n_j – число результатов анализа, в которых значения определяемого показателя выше наиболее часто встречаемого диапазона колебаний, n_j – общее число значений); β – кратность превышения общей численности над средней по наиболее часто встречаемым значениям ($\beta = \text{высокое значение} / M_{oc}$); относительная численность коловраток в зоопланктоне, N_{rot} , %; общая численность зообентоса, N_{zb} , тыс. экз./м²; относительная численность олигохет в зообентосе, N_{ol} , %.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение

Гидрохимическая характеристика поверхностных вод

Динамика основных гидрохимических показателей в районе исследования приведена в таблице 1.

Величины рН воды колебались в интервале 7.8–8.4 единиц, достигая максимальных значений – 9.2 ед. в летний период в воде Саралинского участка, что может быть связано с массовым развитием фитопланктона.

Газовый режим характеризовался нормальным содержанием растворенного кислорода в поверхностном слое на протяжении всего периода наблюдения (9.1–13.3 мгО₂/л), снижаясь в отдельные периоды до 7.0 мгО₂/л.

В акватории Волжско-Камского плеса (станции 1–3) цветность воды колебалась незначительно (по медиане 42–49 градусов). Присутствием в воде Саралинского участка повышенного содержания железа и органических веществ обусловлены более высокие значения цветности – в среднем 94±36 градусов.

Минерализация вод водохранилища подвержена сезонным колебаниям, увеличиваясь от весны к осени. Из числа соединений биогенных элементов можно выделить азот аммонийный и нитритный, концентра-

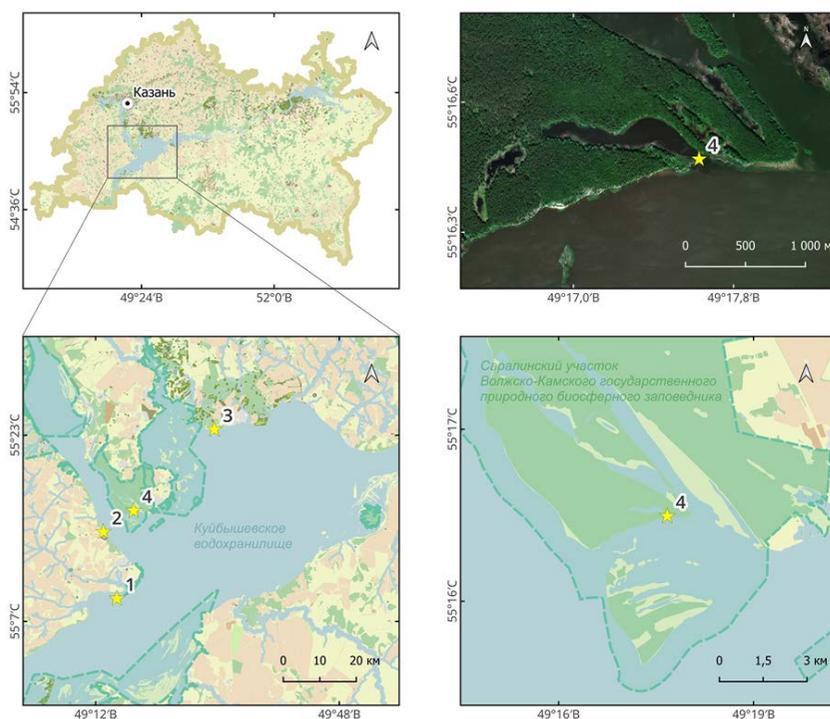


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды в Куйбышевском водохранилище:

1 – Заовражные Каратаи, 2 – Тенишево, 3 – Лаишево, 4 – Саралинский участок ВКГПБЗ

Fig. 1. Map of water sampling in the Kuibyshev reservoir: 1 – Zaovrazhnye Karatai, 2 – Tenishevo, 3 – Laishevo, 4 – Saralinsky section of the natural reserve

Таблица 1. Гидрохимические показатели качества воды на станциях мониторинга
Table 1. Hydrochemical indicators of water quality at monitoring stations

Показатели Indexes	ПДК MPC	Заовражные Каратаи Zaovrazhnyye Karatai			Тенишево Tenishevo			Лайшево Laishevo			Саралы Saraly					
		М±δ	Мин	Макс	М±δ	Мин	Макс	М±δ	Мин	Макс	М±δ	Мин	Макс			
Цветность, град. Color, deg.	-	53±21	48	17	79	49	19	84	44±16	42	25	76	94±36	84	59	168
pH, ед. pH, un.	6,5-8,5	7,8±0,2	7,9	7,2	8,0	7,9	7,0	8,2	8,0±0,3	8,0	7,5	8,6	8,4±0,6	8,5	7,1	9,2
Раствор. кислород, мг/л Dissolved oxygen, mgO ₂ /l	>6,0	9,2±1,4	9,3	7,0	12,0	9,1	7,3	10,5	9,3±0,9	9,5	7,8	10,6	13,3±2,1	12,9	11,2	16,3
Жесткость, мг-экв./л Hardness, mEq/l	-	2,7±0,9	3,0	1,2	3,7	3,1	1,2	4,1	2,8±0,8	3,0	1,2	3,8	3,4±0,7	3,5	2,4	4,6
Кальций, мг/л Calcium, mg/l	180	39,8±12,7	42,1	17,3	57,9	44,9	17,7	52,9	40,8±13,5	46,4	11,9	54,5	49,8±8,8	51,7	34,8	63,7
Магний, мг/л Magnesium, mg/l	40	9,5±4,7	9,7	1,4	17,3	10,7	3,9	17,5	9,2±3,8	9,7	4,2	16,4	11,5±3,6	12,2	5,6	17,0
Хлориды, мг/л Chlorides, mg/l	300	12,5±3,3	11,3	7,4	18,0	10,2	8,0	18,3	32,9±10,2	31,2	19,2	52,4	32,7±16,8	24,1	17,5	70,9
Сульфаты, мг/л Sulfates, mg/l	100	47,0±15,2	47,6	18,9	76,2	47,9	33,3	71,4	59,0±17,5	60,0	28,3	95,2	45,1±22,6	41,0	10,9	89,2
Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	-	237±45	240	153	298	239	173	335	259±48	268	156	339	273±48	286	200	339
Азот нитратов, мг/л Nitrate nitrogen, mgN/l	9,0	0,30±0,25	0,25	0,02	0,80	0,28	0,00	0,94	0,19±0,14	0,21	0,01	0,38	0,31±0,14	0,31	0,13	0,55
Азот нитритов, мг/л Nitrite nitrogen, mgN/l	0,02	0,02±0,02	0,02	0,00	0,10	0,01	0,00	0,03	0,01±0,00	0,01	0,00	0,01	0,02±0,02	0,02	0,004	0,08
Азот аммонийный, мг/л Ammonium nitrogen, mgN/l	0,4	0,28±0,22	0,22	0,05	0,79	0,23	0,05	0,46	0,25±0,38	0,14	0,02	1,47	0,45±0,27	0,48	0,04	0,94
Фосфаты, мг/л Phosphates, mg/l	0,15	0,06±0,02	0,05	0,03	0,10	0,05±0,02	0,03	0,1	0,02±0,02	0,02	0	0,05	0,09±0,08	0,08	0,01	0,44
Алюминий, мг/л Aluminum, mg/l	0,04	0,07±0,10	0,04	0,00	0,37	0,05±0,05	0,03	0,17	0,06±0,09	0,03	0,00	0,35	0,03±0,02	0,02	0,00	0,07
Железо общ., мг/л Iron, mg/l	0,1	0,08±0,11	0,03	0,00	0,31	0,07±0,10	0,02	0,27	0,06±0,12	0,03	0,00	0,45	0,09±0,06	0,08	0,04	0,21

ция которых в отдельных случаях превышала ПДК в весенний период на всех исследованных участках, что связано с выносом азотсодержащих соединений с поверхностным стоком, а также фосфора фосфатов, концентрация которого осенью (октябрь) была выше ПДК для мезотрофных водоемов в результате снижения интенсивности биохимических процессов на фоне понижения температуры воды (табл. 1).

Качество воды на Саралинском участке водохранилища формируется в большей степени под влиянием камских вод. Сравнение гидрохимических показателей воды Саралинского участка с показателями других станций показало значимые ($p < 0.05$) отличия по показателям цветности, ионам азотной группы, фосфору фосфатов.

Характеристика фитопланктонного сообщества. За период наблюдений в составе фитопланктона исследуемых участков водохранилища было выявлено 117 таксонов водорослей, относящихся к 7 отделам (табл. 2). Наибольшее разнообразие таксонов водорослей выявлено на станции Саралы, Тенишево, наименьшее – Заовражные Каратаи.

Наибольшее разнообразие водорослей отмечалось в весенний период, когда в планктоне водохранилища присутствовали водоросли практически из всех отделов. Летом в фитопланктоне, наряду с массовым развитием синезеленых водорослей, вызывающих «цветение» воды, продолжали развиваться диатомовые и зеленые водоросли. В отдельные годы развитие синезеленых водорослей продолжалось и в осенний период.

В период пика численности фитопланктона (рис. 2) преобладали синезеленые *Planktolyngbya limnetica* (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb и диатомовые *Aulacoseira italica* (Ehr.) Kiitz., *Stephanodiscus hantzschii* Grun. Численность и биомасса фитопланктона достигали максимальных значений в

летний период, минимальных – весной или осенью (табл. 3).

Весной в фитопланктоне водохранилища по численности доминировали синезеленые, субдоминантами были диатомовые водоросли, и лишь незначительную долю составляли зеленые водоросли. Летом и осенью в планктоне повсеместно доминировали синезеленые водоросли, составляя до 88% общей численности фитопланктона. В последние годы наблюдается тенденция увеличения количественных показателей фитопланктона в осенний период (рис. 2), что связано с изменением климатических условий, в частности потеплением климата и сдвигом календарного лета в сторону осени. Также прослеживается общая тенденция увеличения численности и биомассы фитопланктона за последние годы (рис. 2), что связано с увеличением антропогенной нагрузки на водохранилище, а также климатическими и гидрологическими факторами.

Основу биомассы фитопланктона в течении всего сезона и особенно весной составляли диатомовые водоросли. Летом и осенью, помимо диатомовых, значительный вклад в образование биомассы фитопланктона вносили синезеленые и зеленые водоросли.

Гидрологические особенности определяют различия в составе и количественных характеристиках фитопланктона на открытых участках водохранилища. На участке обширного открытого мелководья с глубинами до 4 м в районе станции Лаишево отмечались максимальные значения численности и биомассы водорослей (табл. 3).

В русловой части р. Волга, в районе станции Тенишево глубина достигает 16 м. Для данного участка характерны минимальные значения численности и биомассы водорослей (табл. 3). За период наблюдений численность фитопланктона здесь изменялась от 0.05 до 12.65 млн.кл/л, био-

Таблица 2. Число таксонов водорослей по станциям мониторинга
Table 2. Number of algae taxa by monitoring stations

Отделы водорослей Algae taxa	Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	Тенишево Tenishevo	Лаишево Laishevo	Саралы Saraly
Цианопрокариота	8	9	8	15
Bacillariophyta	25	34	29	37
Chlorophyta	21	24	24	42
Cryptophyta	1	2	1	4
Euglenophyta	5	5	5	11
Dinophyta	1	1	1	3
Chrysophyta	4	5	2	5
Всего / Total	65	80	70	117

масса – от 0.11 до 3.89 мг/л. Минимальные их значения были отмечены весной, максимальные – летом.

На участке у станции Заовражные Каратаи с глубинами до 3 м, численность фитопланктона варьировала от 0.23 до 22.82 млн.кл/л, биомасса – от 0.18 до 4.72 мг/л. В течение всего сезона на этом участке по численности доминировали синезеленые водоросли, достигая максимума развития осенью.

Таким образом, открытые участки водохранилища по уровню развития фитопланктона и трофическому индексу Милиуса (табл. 3) относились к мезотрофному типу. Однако, в многолетнем аспекте количественные показатели значительно варьировали и достигали максимальных значений в 2019 и 2021 годах, что указывает на увеличение в эти годы трофности водоема.

Выявленные на открытых участках Куйбышевского водохранилища тенденции развития фитопланктона характерны и для других водохранилищ Волжского бассейна (Охапкин и др., 2013).

На участке в акватории Саралинского участка ВКГПБЗ состав и количественные характеристики фитопланктона, как и следовало ожидать, достоверно отличались от открытых участков водохранилища (критерий Манна-Уитни, $p < 0.05$). Здесь было обнаружено 117 таксонов водорослей из 7 отделов: синезеленые – 15, диатомовые – 37, зеленые – 42, эвгленовые – 11, золотистые – 5, криптофитовые – 4, динофитовые – 3. Больше всего таксонов обнаружено в осенний период (92), летом меньше – (82). Осенью в планктоне увеличивается доля диатомовых, зеленых и эвгленовых водорослей. Проведенный корреляционный анализ (критерий Спирмена, $p < 0.05$) показал умеренную положительную зависимость ($r = 0.44$) числа видов диатомовых водорослей от цветно-

сти воды, которая на Саралинском участке имеет более высокие значения в течении всего сезона и особенно осенью.

Летом в планктоне доминировали зеленые и синезеленые водоросли, на долю которых приходилось 42 и 34 % общей численности, которая в целом достигла 192.58 млн.кл./л, биомасса фитопланктона составила 65.41 мг/л. Высокие значения биомассы определялись развитием диатомовых водорослей (81.5%) и, в частности, *St. hantzschii* (60.3%). Значения индекса трофности по Милиусу – составили 66.3, что соответствует эвтрофному состоянию.

На основании статистических характеристик фитопланктона (табл. 4) можно отметить, что, в водной экосистеме открытых участков Куйбышевского водохранилища присутствуют процессы, связанные с высоким уровнем эвтрофирования с элементами экологического регресса.

Трофический статус Саралинского водного участка ВКГПБЗ, оцененный как эвтрофный, имеет тенденцию к дальнейшему эвтрофированию.

В целом развитие фитопланктона обуславливается целым комплексом факторов, таких как температура, уровеньный режим, содержание биогенных и минеральных веществ и др. Выявленная корреляционная зависимость численности фитопланктона исследованных участков от температуры воды ($r = 0.50$) была отмечена ранее для фитопланктона Мешинского залива Куйбышевского водохранилища (Любина, Гречухина, 2022).

В условиях изменения (потепления) климата в современную эпоху, вызванного, как считается, преимущественным увеличением содержания диоксида углерода антропогенного происхождения в атмосферном воздухе (Meleshko et al., 2010), фитопланктон пресноводных экосистем может рассматриваться как поглотитель CO_2 и перспек-

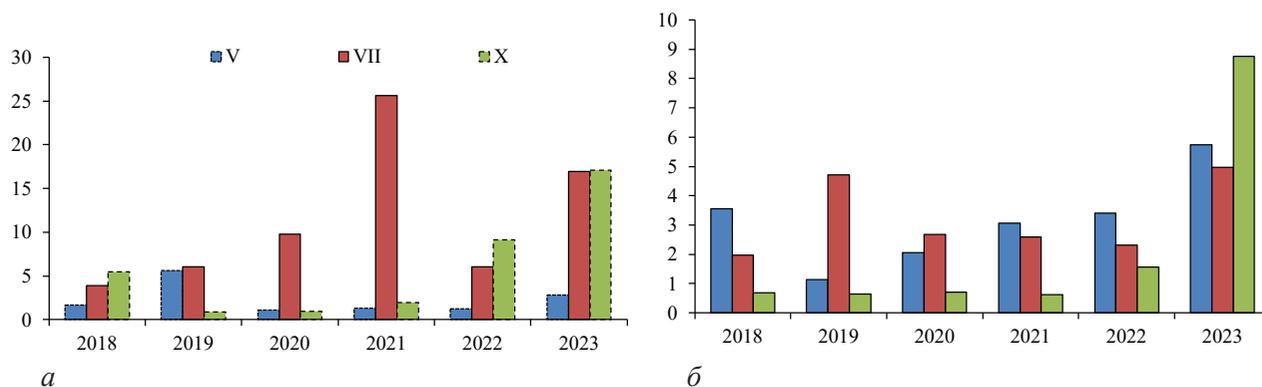


Рис. 2. Годовая динамика численности (а) (млн.кл./л) и биомассы (б) (мг/л) фитопланктона в основные сезоны

Fig. 2. Annual dynamics of number (a) (million cells/l) and biomass (b) (mg/l) of phytoplankton in the main seasons

Таблица 3. Показатели численности, биомассы фитопланктона и значения коэффициента трофии (ITS)
Table 3. Indexes of phytoplankton number, biomass and trophy coefficient (ITS)

Станции мониторинга Monitoring stations	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn	В среднем за сезон Mean in season	ITS
Тенишево Tenishevo	$\frac{2.26 \pm 1.35}{1.58 \pm 0.63}$	$\frac{4.77 \pm 1.98}{1.95 \pm 0.69}$	$\frac{1.14 \pm 0.57}{1.17 \pm 0.42}$	$\frac{2.72 \pm 0.86}{1.57 \pm 0.33}$	45.99 ± 3.22
Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	$\frac{2.29 \pm 1.54}{2.45 \pm 0.88}$	$\frac{4.73 \pm 2.05}{1.54 \pm 0.59}$	$\frac{6.86 \pm 4.04}{0.62 \pm 0.18}$	$\frac{5.15 \pm 1.65}{1.58 \pm 0.38}$	46.13 ± 3.04
Лаишево Laishevo	$\frac{2.04 \pm 0.77}{3.91 \pm 1.72}$	$\frac{19.68 \pm 10.75}{4.94 \pm 0.81}$	$\frac{3.06 \pm 1.58}{0.73 \pm 0.18}$	$\frac{8.26 \pm 3.99}{3.19 \pm 0.76}$	52.35 ± 3.52
Среднее по открытым участкам Average for open areas	$\frac{2.19 \pm 0.67}{2.64 \pm 0.68}$	$\frac{10.26 \pm 3.90}{2.86 \pm 0.64}$	$\frac{3.68 \pm 1.49}{0.84 \pm 0.16}$	$\frac{5.20 \pm 1.47}{2.10 \pm 0.32}$	48.16 ± 1.89
Саралы Saraly	$\frac{3.69 \pm 1.01}{7.49 \pm 2.27}$	$\frac{49.82 \pm 21.36}{16.42 \pm 7.50}$	$\frac{17.09 \pm 3.59}{8.76 \pm 1.70}$	$\frac{29.36 \pm 10.29}{11.95 \pm 3.43}$	66.34 ± 1.80

Примечание: числитель – численность (млн. кл./л), знаменатель – биомасса (мг/л), M±m
Note: numerator – number (million cells/l), denominator – biomass (mg/l), M±m

тивный секвестрирующий компонент экосистемы (Yamasaki, 2003; Iasimone et al., 2017).

Для фитопланктона Саралинского участка характерны высокие количественные показатели в летний период, которые определяются развитием в основном синезеленых водорослей, вызывая «цветение» воды. Тенденции годовой динамики развития фитопланктона, состоящие в сохранении высоких показателей до поздней осени и зависящие от климатических характеристик, характерны и для других водохранилищ Волжского

бассейна (Gorokhova, 2018; Korneva, Solovieva, 2021). Расчеты показали, что для фитопланктона рассмотренной протоки Куйбушевского водохранилища с максимальной биомассой ассимиляция CO₂ может составить 130 г CO₂/м³. При увеличении трофности водоема его потенциал к секвестированию CO₂ увеличивается.

Характеристика зоопланктонного сообщества

На исследованных участках водохранилища в составе зоопланктона было выявлено 60 видов, из

Таблица 4. Статистические характеристики развития фитопланктона
Table 4. Statistical characteristics of phytoplankton development

Станции мониторинга Monitoring stations	Модальный интервал (N/Q)* Modal interval (N/Q)	Статистические характеристики развития фитопланктона Statistical characteristics of phytoplankton						Степень загрязненности Degree of pollution	Эффект антропогенного воздействия Effect of anthropogenic impact
		M _{оч}	M _{чв}	M _{од}	β	α	Π		
Тенишево Tenishevo	$\frac{0.07-7.50}{7-12}$	0.67	12	23	57	42	37	Высокая эвтрофирующая	Элементы экологического регресса
Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	$\frac{0.23-5.05}{4-8}$	1.59	13	50	24	45	17	Высокая эвтрофирующая	Элементы экологического регресса
Лаишево Laishevo	$\frac{0.13-1.88}{6-10}$	0.84	12	18	13	44	44	Высокая эвтрофирующая	Антропогенное напряжение с элементами экологического регресса
Саралы Saraly	$\frac{10.15-22.33}{31-40}$	19.83	36	29	10	70	3	Высокая эвтрофирующая	Антропогенное эвтрофирование

* N – численность, млн. кл./л; Q – число видов.
N – number, million cells/l; Q – number of species.

Таблица 5. Количество видов зоопланктона по станциям
Table 5. Number of zooplankton species by station

Систематическая группа Systematic group	Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	Тенишево Tenishevo	Лаишево Laishevo	Саралы Saraly
Rotifera	22	17	19	18
Cladocera	14	12	9	11
Copepoda	11	12	8	6
Всего / Total	47	41	36	35

которых коловраток (Rotifera) – 29, ветвистоусых ракообразных (Cladocera) – 16 и веслоногих ракообразных (Copepoda) – 15.

Наибольшее видовое разнообразие зоопланктона отмечено в акватории станции Заовражные Каратаи, наименьшее – Лаишево и Саралы (табл. 5). На всех станциях периодически встречались представители понтокаспийской фауны – вселенцы *Heterocope caspia* Sars, 1893 и *H. appendiculata* Sars, 1863.

Количественные параметры развития зоопланктона варьировали в широких пределах (табл. 6). Так, численность изменялась от 0.01 до 635.2 тыс. экз./м³, биомасса – от 0.04 до 6542.2 мг/м³. Максимальные ее значения численности отмечены на станции Заовражные Каратаи, минимальные – на станции Лаишево. Высокие значения биомассы, наоборот, отмечены на станции Лаишево, низкие – на станции Тенишево.

Развитие зоопланктона было обусловлено сезонными особенностями, что согласуется с проведенными ранее наблюдениями (Деревенская, 2020; Подшивалина, 2021). В весенний период в планктоне массово развивались коловратки, до-

стигая до 98% численности. В июле в планктоне начинают развиваться ракообразные – ветвистоусые и веслоногие. В этот период отмечаются максимальные значения их численности и биомассы, а также видового разнообразия. Осенью развитие зоопланктона затухает.

На Саралинском участке за период наблюдений в составе зоопланктона было отмечено 35 видов. Наибольшее видовое разнообразие наблюдалось в летний период (32 вида), наименьшее – осенью (2 вида). Доминирующий комплекс составляли *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Polyarthra dolychoptera* Idelson, 1952, виды р. *Brachionus*, *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, *Mesocyclops leukarti* (Claus, 1857). Количественные показатели зоопланктона максимальными были весной, минимальными – осенью (табл. 6). Основу зоопланктонного сообщества составляли коловратки, на долю которых приходилось весной и осенью 91 и 81% численности соответственно. В июне их доля составляла 64%. В августе в зоопланктоне преобладали веслоногие ракообразные (58% численности). Доля ветвистоусых ракообразных не велика в течение всего сезона (5.4–11.9%). Ранее

Таблица 6. Количественные показатели зоопланктона
Table 6. Quantitative indexes of zooplankton

Показатели Indicators	Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	Тенишево Tenishevo	Лаишево Laishevo	Саралы Saraly
Число видов Number of species	$\frac{4-22}{14}$	$\frac{3-21}{12}$	$\frac{2-22}{12}$	$\frac{2-22}{9}$
Численность, тыс. экз./м ³ Number, th. specimens/m ³	$\frac{0.03-635.2}{87.5\pm 44.1}$	$\frac{0.05-158.9}{26.5\pm 11.1}$	$\frac{0.01-133.9}{18.7\pm 9.4}$	$\frac{0.22-262.0}{82.2\pm 21.9}$
Биомасса, мг/м ³ Biomass, mg/m ³	$\frac{0.04-5401.10}{772.39\pm 382.41}$	$\frac{0.09-2501.11}{362.14\pm 176.25}$	$\frac{0.04-6542.21}{463.11\pm 434.29}$	$\frac{0.16-3147.80}{793.25\pm 263.21}$
N_{rot} , %	1–95.3	0–98.2	0–90.7	15.3–98.6
MI_{rot} / MR_{rot}	1–20	0–28	1–19	73.4–98.6

Примечание: числитель – min-max, знаменатель – $M\pm m$; N_{rot} – относительная численность коловраток, MI_{rot} – модальный интервал численности коловраток.

Note: numerator – min-max, denominator – $M\pm m$; N_{rot} – relative abundance of rotifers; MR_{rot} – modal range of rotifer number

Таблица 7. Количественные показатели зообентоса
Table 7. Quantitative indexes of zoobenthos

Показатели Indexes	Заовражные Каратаи Zaovrazhnye Karatai	Тенишево Tenishevo	Лаишево Laishevo	Саралы Saraly
Число видов на пробу Number of species for sample	8–22 15	6–26 18	4–17 10	7–19 10
Численность, тыс. экз./м ² Number, th. specimens/m ²	0.44–10.16 2.72±0.61***)	0.7–11.96 3.92±0.78	0.28–16.76 3.9±1.2	0.12–4.21 1.12±0.26
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²	0.63–781.76 73.22±51.28	1.77–1043.54 188.66±73.26	0.31–605.76 53.17±39.84	0.77–43.13 9.88±2.58
МИ _{zb}	0.44–2.54	0.7–3.68	0.28–2.92	0.12–1.12
N _{ol} , %	3.2–72.5	4.7–76.8	0–57.1	0.43–27.7
МИ _{ol} / MR _{ol}	3.2–23.0	4.7–17.9	0–15	0.42–6.47

Примечание: числитель – min-max; знаменатель – M±m; МИ_{zb} – модальный интервал численности N_{ol} – относительная численность олигохет, МИ_{ol} – модальный интервал численности олигохет.

Note: numerator – min-max; denominator – M±m; N_{ol} – relative abundance of oligochaetes MR_{ol} – modal range of oligochaetes number

для зоопланктона Саралинского участка указывалось от 43 (Мухортова и др., 2019) до 47 видов (Гвоздарева, Мельникова, 2022), при этом отмечалась доминирующая роль ракообразных, в частности род *Bosmina*. Доминирование коловраток может объясняться гидрологическими особенностями Саралинского участка: мелководностью и отсутствием течения, что в целом способствует их развитию.

По модальному интервалу численности коловраток (табл. 6) инвариантное состояние экосистем исследуемых участков Куйбышевского водохранилища можно охарактеризовать как антропогенное напряжение с элементами экологического регресса. На Саралинском участке отмечается экологический регресс планктонных сообществ.

Характеристика бентосных сообществ

В составе зообентоса изученных участков Куйбышевского водохранилища за период наблюдений был обнаружен 101 вид беспозвоночных из 15 групп, в том числе Oligochaeta 14 видов, Polychaeta – 1, Hirudinea – 5, Mollusca – 26, Crustacea – 7, Hydracarina, Coleoptera, Hemiptera, Trichoptera, Odonata – по 1 виду, Ephemeroptera – 2 вида, Chironomidae – 36 видов, прочие Diptera – 5.

Наибольшее видовое разнообразие зарегистрировано на станции Тенишево – 71, на станции Заовражные Каратаи отмечено 60 и Лаишево – 44 вида. Различия в видовом разнообразии исследованных участков акватории объясняются особенностями слагающих их отложений. Так, на станции Тенишево донные отложения представлены заиленными песками, в Заовражных Каратаях встречаются включения растительных остатков. Для станции Лаишево характерны гли-

нистые илы, что определяет здесь низкое видовое разнообразие зообентоса (табл. 7).

Основу численности зообентоса составляют моллюски и личинки хирономид (31%), на долю олигохет приходилось 23%, на долю ракообразных – 10%. Наименьшие значения численности зообентоса были зарегистрированы весной на станции Лаишево, максимальные там же, но в летний период. Биомасса зообентоса на 97% определялась развитием моллюсков.

Можно отметить, что характеристика бентосного сообщества исследованных участков Куйбышевского водохранилища по видовому разнообразию и структуре не противоречит литературным данным (Степанова и др., 2009; Kondrateva, Stepanova, 2019).

На Саралинском участке выявлено 52 таксона из 9 систематических групп: Oligochaeta – 4, Mollusca – 8, Crustacea – 6, Hydracarina – 1, Ephemeroptera – 2, Trichoptera – 1, Diptera – 30, в том числе Chironomidae – 26, Ceratopogonidae – 1, Diptera sp. – 2. В бентосном сообществе преобладают личинки хирономид *Polypedilum (Polypedilum) nubeculosum* (Meigen 1804), *Glyptotendipes (Gl.) glaucus* (Meigen, 1818), *Cryptochironomus (Cr.) defectus* (Kieffer 1913), *Chironomus* sp.) и ракообразные *Dikerogammarus haemobaphes* (Eichwald, 1848), *Pontogammaru sp.*, *Paramysus sp.* и *Corophium curvispinum* Sars, 1895. По сравнению с остальными участками водохранилища количественные показатели развития зообентоса можно оценить как низкие (табл. 7). Максимальный вклад в общую численность (71.9%) вносят двукрылые (личинки хирономид).

Инвариантное состояние экосистемы Куйбышевского водохранилища в пределах изученной

части акватории по численности зообентоса оценивается как имеющие элементы экологического регресса. В то же время, по уровню развития олигохет (табл. 7) инвариантное состояние можно оценить как испытывающее антропогенное напряжение. Низкие значения численности зообентоса Саралинского участка, а также низкая доля развития олигохет в сообществе характеризуют фоновое состояние придонного сообщества.

Заключение

Таким образом, гидрохимический режим вод исследованных участков Куйбышевского водохранилища находится в стабильном состоянии на протяжении последних шести лет (2018–2023). Превышения ПДК_{рх} периодически отмечались по ионам аммония и нитритов в весенний период, а также по фосфору фосфатов в осенний период. По уровню развития фитопланктона район исследования относится к мезотрофному типу; с использованием статистических характеристик выявлены процессы, связанные с высоким эвтрофированием, которые вызывают элементы экологического регресса.

Оценка инвариантного состояния экосистем Куйбышевского водохранилища на участках мониторинга, расположенных в акватории Волжско-Камского плеса, по уровню развития коловраток в сообществе зоопланктона показала, что наличие в них антропогенного напряжения с элементами экологического регресса. Инвариантное состояние с учетом развития зообентоса также указывает на элементы экологического регресса, а по уровню развития олигохет – на антропогенное напряжение.

Инвариантное состояние водных экосистем Саралинского участка водохранилища по показателям фитопланктона характеризуется антропогенным эвтрофированием, по зоопланктону – экологическим регрессом, по зообентосу – фоновым состоянием придонного сообщества.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету, для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003.

Список литературы

1. Гвоздарева М.А., Мельникова А.В. Количественные показатели зоопланктона и зообентоса акватории Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Экология родного края: проблемы и пути их решения / Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: ВятГУ, 2022. Кн. 2. С. 274–279.

2. Горохова О.Г. Биомасса водорослей и содержание хлорофилла «а» в планктоне рек бассейна Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилищ // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 5(3). С. 358–363.

3. Деревенская О.В. Зоопланктон Куйбышевского водохранилища (по результатам исследований 2020 года) // Труды V Всероссийской научной конференции «Волга 2020». Нижний Новгород: Изд-во ВГУВТ, 2020. Вып. 3. С. 1–5.

4. Куйбышевское водохранилище. Л.: Наука, 1983. 214 с.

5. Любина О.С., Гречухина Л.Г. Сезонная динамика фитопланктона в Мешинском заливе Куйбышевского водохранилища // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1. С. 31–38. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.31.38>

6. Милиус А.Ю., Линдпере А.В., Стараст Х.А. Статистическая модель трофического состояния малых светловодных озер // Водные ресурсы. 1987. №3. С. 63–66.

7. Мухортова О.В., Унковская Е.Н., Сабитова Р.З. Некоторые данные о зоопланктоне Саралинского участка Волжско-Камского заповедника (акватория Куйбышевского водохранилища) // Экологический сборник 7. Актуальные проблемы Волжского бассейна / Труды Всероссийской (с международным участием) молодежной научной конференции. Тольятти: Изд-во ИЭВБ РАН «Анна», 2019. С. 329–332. doi: 10.24411/9999-010A-2019-10083.

8. Никитин О.В., Латыпова В.З., Степанова Н.Ю., Ашихмина Т.Я. Водный участок карбонового полигона «Карбон – Поволжье» в Республике Татарстан // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем / Материалы докладов XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Изд-во ВятГУ, 2022. С. 28–33.

9. Охапкин А.Г., Шарагина Е.М., Бондарев О.А. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища на современном этапе его существования // Поволжский экологический журнал. 2013. №2. С. 190–199.

10. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 08.09.2021 №845 «О внесении изменений в приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 5.02.2021 г. №74 «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса»».

11. Подшивалина В.Н. Особенности распределения зоопланктона в зоне влияния притоков водохранилищ Средней Волги // Биология внутренних вод. 2021. №5. С. 472–480. doi: 10.31857/S0320965221050156.

12. РД 52.24.564-96. Метод оценки загрязненности пресноводных экосистем по показателям развития фитопланктонных сообществ.

13. РД 52.24.620-2000. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем.

14. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 318 с.

15. Степанова Н.Ю., Кондратьева Т.А., Латыпова В.З. Некоторые особенности функционирования донных сообществ верхних плесов Куйбышевского водохранилища // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. №4. С. 22–27.

16. Iasimone F., De Felice V., Panico A., Pirozzi F. Experimental study for the reduction of CO₂ emissions in wastewater treatment plant using microalgal cultivation // Journal of CO₂ utilization. 2017. Vol. 22. P. 1–8. <https://doi.org/10.1252/jcej.36.361>

17. Korneva L.G., Solovieva V.V. Dynamics of multifunctional groups of phytoplankton in the Rybinsk Reservoir and evaluation of its waters by the community index // Journal of water resources. 2021. Vol. 48, №1. P. 65–72. doi: 10.1134/S0097807821010206.

18. Kondrateva T. A., Stepanova N. Yu. Assessment of an ecological state of the Kuibyshev reservoir based on zoobenthos indicators // IOP Conference series: earth and environmental science. 2019. Vol. 288. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/288/1/012053.

19. Meleshko V.P., Kattsov V.M., Karol I.L. Dangerous temptation. Climate impact in the fight against global warming // Journal ecology and life. 2010. №10. P. 44–51.

20. Yamasaki A. An overview of CO₂ mitigation options for global warming-emphasizing CO₂ sequestration options // Journal of chemical engineering of Japan. 2003. Vol. 36. P. 361–375. <https://doi.org/10.1252/jcej.36.361>.

References

1. Gvozdareva M.A., Mel'nikova A.V. Kolichestvennyye pokazateli zooplanktona i zoobentosa akvatorii Saralinskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Quantitative indicators of zooplankton and zoobenthos in the water area of the Saralinsky section of the Volga-Kama Nature Reserve] // Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya. Kirov, 2022. Book 2. P. 274–279.

2. Gorokhova O.G. Biomass of phytoplankton and content of chlorophyll «a» in the rivers of the basin of the Kuibyshevskoe, Saratovskoe and Volgogradskoe reservoirs // Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. Vol. 20, No 5(3). P. 358–363.

3. Derevenskaya O.V. Zooplankton Kujbyshevskogo vodohranilishcha (po rezul'tatam issledovaniy 2020 goda) [Zooplankton of the Kuibyshev Reservoir (based on research results in 2020)] // Trudy V Seros. nauchnoj konferencii «Volga 2020». Nizhniy Novgorod, 2020. Iss. 3. P. 1–5.

4. Kujbyshevskoe vodohranilishche [Kuibyshev reservoir] Leningrad: Nauka, 1983. 214 p.

5. Lyubina O.S., Grechuhina L.G. Sezonnaya dinamika fitoplanktona v Meshinskom zalive Kujbyshevskogo vodohranilishcha [Seasonal dynamics of phytoplankton in the Mesha Bay of the Kuibyshev Reservoir] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 1. P. 31–38. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.31.38>.

6. Milius A.Yu., Lindpere A.V., Starast H.A. Statisticheskaya model' troficheskogo sostoyaniya malyh svetlovodnyh ozer [Statistical model of the trophic state of small light-water lakes] // Vodnye resursy [Water Resources]. 1987. No 3. P. 63–66.

7. Muhortova O.V., Unkovskaya E.N., Sabitova R.Z. Nekotorye dannye o zooplanktone Saralinskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika (akvatoriya Kujbyshevskogo vodohranilishcha) [Some data on the zooplankton of the Saralinsky section of the Volga-Kama Nature Reserve (water area of the Kuibyshev Reservoir)] // Ekologicheskij sbornik 7. Aktual'nye problemy Volzhskogo bassejna. Tol'yatti, 2019. P. 329–332.

8. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Stepanova N.Yu., Ashihmina T.Ya. Vodnyj uchastok karbonovogo poligona «Karbon – Povolzh'e» v Respublike Tatarstan [Water section of the carbon polygon «Carbon - Volga region» in the Republic of Tatarstan] // Biodiagnostika sostoyaniya prirodnyh i prirodnotekhnogennyh sistem [Biodiagnostics of the state of natural and naturally-technogenic systems]. Kirov, 2022. P. 28–33.

9. Ohapkin A.G., Sharagina E.M., Bondarev O.A. Fito-plankton Cheboksarskogo vodohranilishcha na sovremennom

etape ego sushchestvovaniya [Phytoplankton of the Cheboksary Reservoir at the present stage of its existence] // Povolzhskij ekologicheskij zhurnal [Povolzhskiy journal of ecology]. 2013. No 2. P. 190–199.

10. Prikaz Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii ot 08.09.2021 No 845. O vnesenii izmenenij v prikaz Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii ot 5.02.2021 No 74 «O poligonah dlya razrabotki i ispytaniy tekhnologij kontrolya uglerodnogo balansa» [Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated 09.08.2021 No 845. On amendments to the order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated 5.02.2021 No 74 «On testing sites for the development and testing of carbon balance control technologies»].

11. Podshivalina V.N. Osobennosti raspredeleniya zooplanktona v zone vliyaniya pritokov vodohranilishch Srednej Volgi [Features of the distribution of zooplankton in the zone of influence of the tributaries of the Middle Volga reservoirs] // Biologiya vnutrennih vod [Inland water biology]. 2021. No 5. P. 472–480.

12. RD 52.24.564–96. Metod ocenki zagryaznenosti presnovodnyh ekosistem po pokazatelyam razvitiya fitoplanktonnyh soobshchestv [A method for assessing the pollution of freshwater ecosystems based on indicators of the development of phytoplankton communities].

13. RD 52.24.620–2000. Organizatsiya i funkcionirovanie podsistemy monitoringa antropogennogo evtrofirovaniya presnovodnyh ekosistem [Organization and functioning of a subsystem for monitoring anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems].

14. Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnyh ekosistem [Guide to hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems] St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 318 p.

15. Stepanova N.YU., Kondrat'eva T.A., Latypova V.Z. Nekotorye osobennosti funkcionirovaniya donnyh soobshchestv verhnih plesov Kujbyshevskogo vodohranilishcha [Some features of the functioning of bottom communities in the upper reaches of the Kuibyshev Reservoir] // Vestnik RUDN. Seriya «Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti» [Vestnik RUDN. Ser. Ecology and life safety]. 2009. No 4. P. 22–27.

16. Iasimone F., De Felice V., Panico A., Pirozzi F. Experimental study for the reduction of CO₂ emissions in wastewater treatment plant using microalgal cultivation // Journal of CO₂ utilization. 2017. Vol. 22. P. 1–8. <https://doi.org/10.1252/jcej.36.361>.

17. Korneva L.G., Solovieva V.V. Dynamics of multifunctional groups of phytoplankton in the Rybinsk Reservoir and evaluation of its waters by the community index // Journal of water resources. 2021. Vol. 48, No 1. P. 65–72. doi: 10.1134/S0097807821010206.

18. Kondrateva T. A., Stepanova N. Yu. Assessment of an ecological state of the Kuibyshev reservoir based on zoobenthos indicators // IOP Conference series: earth and environmental science. 2019. Vol. 288. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/288/1/012053.

19. Meleshko V.P., Kattsov V.M., Karol I.L. Dangerous temptation. Climate impact in the fight against global warming // Journal ecology and life. 2010. No 10. P. 44–51.

20. Yamasaki A. An overview of CO₂ mitigation options for global warming-emphasizing CO₂ sequestration options // Journal of chemical engineering of Japan. 2003. Vol. 36. P. 361–375. <https://doi.org/10.1252/jcej.36.361>.

Latypova V.Z., Stepanova N.Yu., Kondratieva T.A., Nikitin O.V. **Monitoring of Kuibyshev reservoir surface water in the area of the «Carbon – Povolzhye» polygon water section.**

In a framework of the creation of a passport for the water section of the «Carbon-Povolzhye» polygon, we studied hydrochemical and hydrobiological status of the waters in the area of the Volga-Kama reach of the Kuibyshev reservoir in the water area of the Saralinsky section of the natural reserve. The seasonal dynamics of the main hydrochemical indicators of the study area revealed the stable status of the hydrochemical regime in 2018-2023. The water in those areas in different years and seasons was characterized by exceeding the maximum permissible concentration for ammonium and nitrite nitrogen, as well as for phosphorus and phosphates. Comparison of chemical and biological indicators of water using nonparametric statistics (the Mann-Whitney test for $p < 0.05$) showed the significant difference in water color, ions of nitrogen group, phosphorus phosphates, as well as the number and biomass of phytoplankton, the number of rotifers in the Saralinsky area from similar ones at monitoring stations of open areas of the Kuibyshev water reservoir. An analysis of the statistical characteristics of phytoplankton in open areas of the water

reservoir revealed the mesotrophic status of ecosystems as a whole, and processes of eutrophication that cause elements of ecological regression. Indicators of quantitative development of phytoplankton in those areas were determined by the hydrological features of the study areas. Statistical analysis of the phytoplankton data revealed the mesotrophic status of ecosystems as a whole, also along with the occurrence of eutrophication processes that caused elements of ecological regression. Indicators of quantitative development of phytoplankton were determined by the hydrological features of the study areas. The trophic status of the section of the Saralinsky area was assessed as mesotrophic with trend to further eutrophication depending on climatic characteristics. An assessment of the invariant status of the ecosystems based on the level of development in the zooplankton community showed the presence of anthropogenic stress in the ecosystem with elements of ecological regression, and according the development of zoobenthos - elements of ecological regression. The invariant status was assessed as anthropogenic stress by the level of development of oligochaetes.

Keywords: Kuibyshev reservoir; Carbon – Povolzhye polygon; surface waters; hydrochemistry; hydrobiology, monitoring.

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: 17.10.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 02.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 21.11.2023

Сведения об авторах

Латыпова Венера Зиннатовна, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент АН РТ, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18; ведущий научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: ecoanrt@yandex.ru.

Надежда Юльевна Степанова, доктор биологических наук, профессор, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: step090660@yandex.ru.

Кондратьева Татьяна Анатольевна, кандидат биологических наук, гидробиолог, Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Татарстан, 420021, Россия, г. Казань, ул. Заводская, 3, E-mail: tatjana_kondrate@mail.ru.

Никитин Олег Владимирович, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой, Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: oleg.nikitin@kpfu.ru.

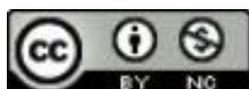
Information about the authors

Venera Z. Latypova, D.Sci. in Chemistry, Professor, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia; 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: ecoanrt@yandex.ru.

Nadezhda Yu. Stepanova, D.Sci. in Biology, Professor, Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, e-mail: step090660@yandex.ru.

Tatiana A. Kondratieva, Ph.D. in Biology, Hydrobiologist, Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Republic of Tatarstan, 3, Zavodskaya st., Kazan, 420021, Russia, E-mail: tatjana_kondrate@mail.ru.

Oleg V. Nikitin, Ph.D. in Geography, Associate Professor, Head of Department, Kazan Federal University, 18, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: oleg.nikitin@kpfu.ru.



^{1,3}М.В. Косова, ¹О.Ю. Деревенская, ²Е.Н. Унковская,
³Н.В. Шурмина, ³Ф.М. Мухаметзянова

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, mary.burupina96.5@yandex.ru

²Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник

³Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК ЗООПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА ЗАРАСТАЮЩЕГО ВОДОЕМА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ИЛАНТОВО ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА)

Представлены результаты сезонных гидрохимических и гидробиологических исследований озера Илантово, расположенного на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника. Рассмотрено распределение беспозвоночных организмов в литорали и пелагиали озера, влияние высшей водной растительности на формирование сообществ зоопланктона и сезонная изменчивость его структурных показателей. Таксономический состав зоопланктона озера насчитывал 110 видов и в основном был представлен коловратками. В зарослях макрофитов отмечен 41 вид фитофильного зоопланктона. В различных по видовому составу зарослях зоопланктоценозы имеют относительно низкое видовое сходство. В литоральной части отмечены высокое видовое разнообразие, но низкие численность и биомасса сообществ зоопланктона по сравнению с пелагиалью. Существенные колебания численности и биомассы зоопланктона обусловлены массовым развитием отдельных видов, особенно при благоприятных гидротермических условиях. С увеличением трофического статуса озера индекс видового разнообразия зоопланктона снижается.

Ключевые слова: зоопланктон; структура; видовое разнообразие; высшая водная растительность; трофность; Волжско-Камский заповедник.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.50.59>

Введение

Одной из основных задач заповедных территорий является изучение естественного хода природных процессов, в том числе связанных с изменением гидрологического режима.

Заболачивающееся озеро Илантово входит в систему 12 разнотипных озер, расположенных на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (Республика Татарстан). По происхождению оно является суффузионным. По версии А.С. Тайсина (2006), озеро относительно молодое, возникло на месте заболоченного леса путём просадки грунта (о чем свидетельствуют многочисленные пни). Заросшая макрофитами часть водоема глубиной менее 0.5 м занимает больше половины площади, что скорее напоминает озеро-болото. Одновременно с заилением происходит опускание отдельных участков дна, в открытой части ранее фиксировались ямы глубиной до 3.0 м. Мощность донных отложений озера достигает 1.2–1.3 м, часть из них представлена глинистым аллювием – показателем связи с рекой Сумка в период разлива (Тайсин, 2006).

Питание оз. Илантово осуществляется в весенний период поверхностным стоком талых вод, в летний – исключительно атмосферными осадками. После вскрытия озера во второй половине апреля вода в нем быстро прогревается, и уже в конце второй декады июня максимальная температура воды может достигать 29 °С. Вода в озере не стратифицирована. Уровень воды обычно понижается в августе-сентябре на 0.2 м и более вследствие испарения с поверхности на фоне недостаточного количества выпадающих осадков.

Площадь озера (без заболоченных участков в северо-восточной части) составляет 4.8 га, максимальная глубина 2.5 м отмечена в северной части, средняя не превышает 0.66 м. Водоем характеризуется присутствием различных экотопов, которые представлены детерминированными биоценозами.

В 1970–1990 гг. озеро испытывало хроническое загрязнение из-за поступления сточных вод с территории зверосовхоза «Раифский». Нарушились процессы самоочищения озера, отмечались признаки деградации экосистемы (Косова

и др., 2021).

Донные отложения литоральной части озера сформированы мелкопесчаным серым илом с преобладанием тонкой пелитовой фракции, включающей полуразложившиеся остатки высших водных растений, зоопланктона и диатомовых водорослей рода *Diatoma*. Глубоководная часть водоема (до 2.5 м) – пелагиаль, представлена зеленовато-серым мелкоалевритовым илом, состоящим из тонкого детрита водорослей (Шерышева и др., 2011).

В середине июня начинается интенсивное развитие высшей водной растительности, которая на 65–70% покрывает водное зеркало (рис. 1). В северо-западной части озера свободно от зарослей макрофитов. Здесь нет возможности для прикрепления корневищ кубышки желтой (*Nuphar lutea* (L.) Smith), которая занимает ведущую роль в фитоценозе оз. Илантово.

Значительную часть акватории занимают другие представители гидрофлоры: рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), кувшинка белоснежная (*Nymphaea candida* J. Presl), элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.). В литоральной части представлены другие виды: тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin.), сальвиния плавающая (*Salvinia natans* (L.) All.), водокрас обыкновенный (*Hydrocharis morsur-ranae* L.), рогоз узколистный (*Tyrha angustifolia* L.), осоки (*Carex rostrata* Stokes, *C. acuta* L.), ряска (*Lemna minor* L., *L. trisulca* L.) (Шерышева и др., 2011).

Мониторинговые исследования зоопланктона оз. Илантово проводятся сотрудниками Волжско-Камского заповедника с 1984 г. Также имеются отдельные публикации по таксономическому составу фитофильного комплекса зоопланктона (Мухортова и др., 2012), структурным характеристикам сообщества зоопланктона в межгодовой динамике (Деревенская и др., 2016; Косова и др., 2021). Малоисследованными остаются фауна коловраток и ракообразных, сезонная и многолетняя динамика количественных показателей зоопланктона разных биотопов озера.

Цель исследования – выявить структуру сообществ зоопланктона оз. Илантово в сезонной и межгодовой динамике для различных биотопов (литораль, пелагиаль, заросли макрофитов).

Материалы и методы исследования

Периодичность гидробиологических отборов отличалась по годам. В 2019 г. пробы зоопланктона отбирали однократно в начале июля с 9 станций. Среди них мониторинговые станции за-

поведника (ст. 1, ст. 2), станции, расположенные в сообществах высших водных растений: ст. 3 – заросли кубышки и элодеи, ст. 4 – заросли элодеи, ст. 5 – заросли кубышки, ст. 6 – заросли рдеста; а также станции, расположенные в прибрежной зоне в зарослях макрофитов, но без выраженного доминирования (ст. 7–9). Станция 7 расположена в юго-восточной части озера в 5 м от берега, в зарослях тростника, элодеи, сальвинии и роголистника, станция 8 – в восточной части озера в 2 м от берега, в ассоциации роголистника, элодеи, осоки ср. Станция 9 расположена в северо-восточной части озера в 3 м от берега, представлена ассоциациями тростника, водокраса, элодеи и осоки ср. (рис. 2).

В 2020 г. пробы отбирали в начале июля с одной контрольной станции (ст. 2), в 2021–2022 гг. – с двух контрольных станций: в литорали (ст. 1) и пелагиали (ст. 2) на протяжении всего вегетационного периода подекадно (с мая по сентябрь в 2021 г. и с июня по сентябрь в 2022 г., соответственно). В литорали пробы зоопланктона отбирали путем процеживания 50 л воды через сеть Апштейна. В пелагиали облавливали весь столб воды при помощи сети Джеди (размер ячеек 90 мкм, диаметр входного отверстия 12 см). Камеральную обработку проб проводили согласно общепринятым гидробиологическим методикам (Методические ..., 1982). Пробы зоопланктона просматривали под микроскопом Биолам и Микромед, встреченные организмы определяли до вида (в некоторых случаях до подвида) по определителям (Алексеев и др., 2010; Кутикова, 1970). Планктонные виды рода *Synchaeta* в просмотренных пробах были редки и не всегда определимы до вида, так как требуют идентификации *in situ*. Всего было



Рис. 1. Заросли макрофитов в оз. Илантово (фото М.В. Косовой)

Fig. 1. Macrophyte thickets in Ilantovo lake (photo by M.V. Kosova)

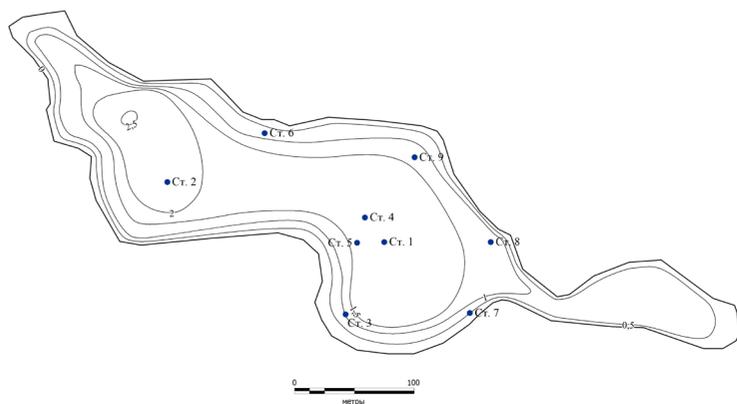


Рис. 2. Схема-карта расположения станций отбора в оз. Илантово
Fig. 2. Schematic map of the location of sampling stations in Ilantovo lake

отобрано и обработано 30 количественных проб зоопланктона.

Для оценки степени разнообразия и сложности сообществ зоопланктона использовали индекс Шеннона (рассчитанный по биомассе). Определяли индекс доминирования Симпсона (Макрушин и др., 1976). Степень сходства видового состава сообществ зоопланктона оценивали по коэффициенту Серенсена-Чекановского. Определяли трофическое состояние озера по биомассе зоопланктона (Китаев, 1984) и по индексу Карлсона (TSI), рассчитанному по величине прозрачности. Кластерный анализ проводили методом одиночной связи, используя в качестве меры евклидово расстояние.

Параллельно были отобраны гидрохимические пробы. Пробы воды отбирали на контрольных станциях в июле 2019–2020 гг., в мае–сентябре 2021 г. и в июне–сентябре 2022 г. Отбор гидрохимических проб проводился из поверхностного и придонного горизонтов; всего обработано 14 проб по 24 показателям. При отборе гидрохимических проб фиксировали физические показатели воды *in situ*: прозрачность (по диску Секки), температуру по горизонтам. Гидрохимические исследования выполнены по стандартным методикам. Тип воды определялся по шкале О.А. Алекина (Алекин, 1970). Оценка качества воды выполнена в соответствии с РД 52.24.643–2002 по обязательному перечню из 15 загрязняющих веществ с включением 3 специфических показателей, имеющих локальное значение (рН, фосфат-ионы, сероводород и сульфиды).

Результаты и их обсуждение

По результатам гидрохимических исследований вода в озере относилась к гидрокарбонатному классу кальциевой группы второго типа,

сумма главных ионов (минерализация) в сезонной и межгодовой динамике варьировалась от 31.7 до 121.4 мг/дм³. Среднегодовые концентрации анионов увеличивались с 2019 по 2022 гг. и составляли: HCO₃⁻ 27.5–62.1 мг/дм³, SO₄²⁻ 1.2–10 мг/дм³, Cl⁻ 0.3–10 мг/дм³ при постоянных значениях катионов: Ca²⁺ 7.8 мг/дм³ и Mg²⁺ 3.3 мг/дм³.

Водородный показатель соответствовал нейтральной реакции среды (6.7–7.3 ед. рН), только в осенний период снижаясь до слабокислой – 5.9. Общая жесткость соответствовала категории «мягкая» по всей толще воды, изменяясь в диапазоне 0.49–1.01 ммоль/дм³.

Газовый режим характеризовался нормальным насыщением кислорода. В поверхностных слоях содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 7.3–8.7 мг/дм³ (95.5–112.6% насыщения), снижалось до 2.7–5.5 мг/дм³ (46.2–57.5% насыщения) в придонных слоях. Накопления на дне сероводорода и сульфидов не выявлено (<0.002 мг/дм³).

Уровень биогенной нагрузки и количество органических веществ (по величине БПК₅ и ХПК) различались по сезонам и в межгодовой динамике. Величина БПК₅ составляла в среднем 4.14 мгО₂/дм³ у поверхности и 5.61 мгО₂/дм³ у дна (2–2.8 ПДК_{рх}), ХПК составляло, соответственно, 47.2 и 55.0 мг О/дм³ (табл. 1). За весь период исследований максимальные значения показателей содержания органических веществ (БПК₅ 8.0 мгО₂/дм³, ХПК 80.0 мг О/дм³) были отмечены в августе 2022 г.

Среди биогенных элементов среднегодовые концентрации нитритов и нитратов не превышали 0.02 мг/дм³ и 0.7 мг/дм³, соответственно. Концентрация ионов аммония составляла в поверхностных слоях 0.05–0.73 мг/дм³, в придонных – 0.05–0.78 мг/дм³ (до 1.6 ПДК_{рх}). Концентрация фосфат-ионов практически всегда во всей толще составляла 0.05 мг/дм³, и только в июле 2020 г. в придонных слоях достигала 0.74 мг/дм³ (1.2 ПДК_{рх}).

За период наблюдений в воде озера фиксировались превышения рыбохозяйственных нормативов по марганцу – 3.5–9.9 ПДК, железу общему – 1.4–4.4 ПДК, меди – 1.9–5.3 ПДК; концентрации цинка, никеля, свинца не превышали допустимых.

Результаты расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) показали, что качество воды в оз. Илантово соответствова-

Таблица 1. Содержание органических и биогенных веществ в оз. Илантово
Table 1. Content of organic and biogenic substances in Ilantovo lake

Горизонт Horizon	pH	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³ BOD ₅ , mgO ₂ /dm ³	ХПК, мгО/дм ³ COD, mgO/dm ³	NH ₄ ⁺ , мг/дм ³ mg/dm ³	NO ₂ ⁻ , мг/дм ³ mg/dm ³	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ mg/dm ³	PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³ mg/dm ³	Fe общ., мг/дм ³ Fe total, mg/dm ³
Поверхность Surface	6.0-7.3* 6.7±0.1	1.4-7.9 4.1±2.1	33.7-67.0 47.2± 4.0	0.05-0.73 0.27± 0.07	0.02-0.03 0.02±0.0	0.10-0.79 0.45±0.09	0.05-0.05 0.05±0.0	0.15-1.02 0.58±0.08
Глубина 1.5-2.0 м Depth 1.5-2.0 m	5.9-6.9 6.4±0.1	4.0-8.0 5.6±0.5	38.8-80.0 55.0± 5.4	0.05-0.78 0.35± 0.09	0.02-0.02 0.02±0.0	0.10-0.93 0.51±0.11	0.05-0.74 0.14±0.09	0.10-2.80 1.08±0.29

Примечание: числитель – минимальные и максимальные значения, знаменатель – среднее ± ошибка средней (n=14)
Note: numerator – minimum and maximum values, denominator – mean ± mean error (n=14)

ло 2 классу «слабо загрязнённая». Коэффициент комплексности загрязнённости изменялся от 23.5 до 52.9%. Критических показателей загрязнённости ($S_{ij} > 9$) не отмечено. Экстремально высокий уровень загрязнённости был отмечен по таким показателям как БПК₅, ХПК, железо общее, фенолы, медь и марганец, средний уровень загрязнённости – по аммонии и растворенному кислороду. По повторяемости случаев загрязнённости загрязнённость воды по всем рассматриваемым ингредиентам определялась как «характерная».

Озеро Илантово отличается относительно богатой фауной зоопланктона. За период исследования в озере было встречено 110 видов. В 2006 г. такое же высокое видовое разнообразие зоопланктона озера отмечала О.В. Мухортова (Мухортова и др., 2012). Более половины – 74 вида (67%) составляют коловратки (Rotifera). Менее разнообразны по составу ветвистоусые

(Cladocera) и веслоногие (Copepoda) ракообразные – 24 вида (22%) и 12 видов (11%), соответственно.

Коловратки были представлены 2 отрядами и 17 семействами. Значительным разнообразием видов отличались семейства Synchaetidae (12), Trichocercidae (12) и Brachionidae (10). Постоянно из коловраток встречались *Asplanchna priodonta* (Gosse, 1850), *Brachionus angularis* (Gosse, 1851), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Polyarthra dolichoptera* (Idelson, 1925), *Polyarthra major* (Burckhardt, 1900), *Trichocerca similis* (Wierzejski, 1893).

Ветвистоусые ракообразные принадлежали к 1 отряду и к 6 семействам. К семействам Chydoridae (10) и Daphniidae (8) относилось наибольшее число видов. Виды *Bosmina longirostris* (Muller, 1776), *Ceriodaphnia quadrangula* (Muller, 1785), *Leptodora kindtii* (Focke, 1844) отмечались

на протяжении всего периода исследований.

Наименее разнообразны веслоногие ракообразные, они относились к одному отряду и были представлены одним семейством – Cyclopidae (12). Наиболее часто встречались *Thermocyclops crassus* (Fischer, 1853) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863).

В 2019 г. при изучении приуроченности видов зоопланктона к различным биотопам, в разных ассоциациях высшей водной растительности был выявлен 41 вид зоопланктона, в том числе 31 вид коловраток, 8 видов ветвистоусых и 2 вида веслоногих рачков. Фактор мелководности озера и наличие в нем высшей водной растительности влияют на формирование фитофильного

Таблица 2. Доминирующие виды зоопланктона в сообществах высших водных растений оз. Илантово в 2019 г.
Table 2. Dominant zooplankton species in higher aquatic plant communities of Ilantovo lake in 2019

Заросли макрофитов Macrophyte thickets	Доминантные виды Dominant species	
	по численности abundance	по биомассе biomass
Кубышка + элодея	<i>Gastropus hyptopus</i> <i>Asplanchna priodonta</i>	<i>Asplanchna priodonta</i>
Элодея	<i>Asplanchna priodonta</i> <i>Keratella cochlearis</i>	<i>Asplanchna priodonta</i>
Кубышка	<i>Keratella cochlearis</i> <i>Bosmina longirostris</i>	<i>Thermocyclops crassus</i> <i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin, 1848) <i>Bosmina longirostris</i> <i>Asplanchna priodonta</i>
Рдест	<i>Keratella cochlearis</i> <i>Gastropus hyptopus</i>	<i>Thermocyclops crassus</i> Копеподитные стадии (Copepoditii II)
Тростник + элодея + сальвиния + роголистник	<i>Syncheta sp.</i>	<i>Trichocerca cylindrica</i> (Inhof, 1891)
Осока + элодея + роголистник	Науплиальная стадия (Nauplii)	<i>Asplanchna priodonta</i> , <i>Thermocyclops crassus</i>
Тростник + водокрас + элодея + осока	<i>Keratella cochlearis</i>	<i>Thermocyclops oithonoides</i>

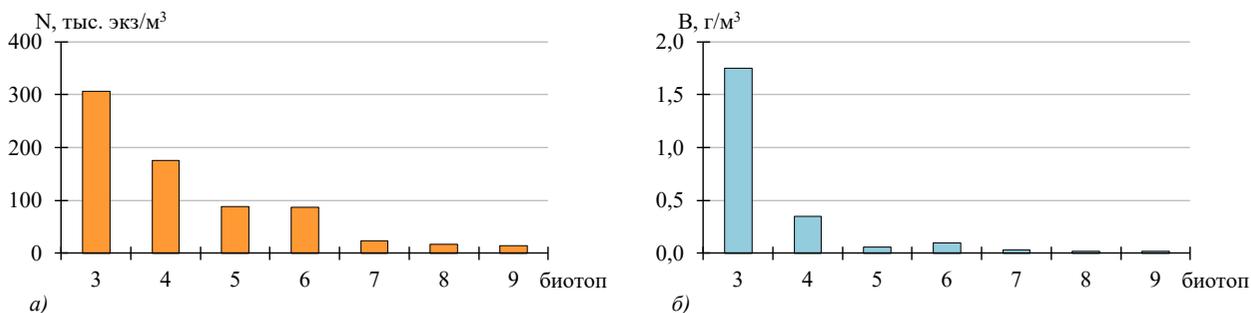


Рис. 3. Численность (N) (а) и биомасса (B) (б) зоопланктона в сообществах высшей водной растительности в 2019 г.: 3 – кубышка и элодея; 4 – элодея канадская; 5 – кубышка желтая; 6 – рдест пронзеннолистный; 7 – тростник, элодея, сальвиния и роголистник; 8 – осока, элодея и роголистник; 9 – тростник, водокрас, элодея и осока

Fig. 3. Zooplankton abundance (N) (a) and biomass (B) (b) in communities of higher aquatic vegetation in 2019: 3 – yellow water-lily and elodea; 4 – elodea; 5 – yellow water-lily; 6 – pondweed; 7 – reed, elodea, salvinia and hornwort; 8 – sedge, elodea and hornwort; 9 – reed, vodokras, elodea and sedge

зоопланктона и его разнообразие.

Для определения трофических групп организмов использовались классификации И.Ф. Кривенковой (Кривенкова, 2018), М.Г. Борисович и В.А. Яковлева (Борисович и др., 2011).

Основу трофической группы зоопланктона составляют вертикаторы: виды родов *Brachionus*, *Euchlanis*, *Keratella*, *Lecane*, *Polyarthra*, *Syncheta*, *Trichotria truncata* (Whitelegge, 1889), *Pompholix complanata* (Gosse, 1851), *Scaridium longicaudum* (Muller, 1786), *Lepadella rhomboides* (Gosse, 1886), *Mytilina ventralis* (Ehrenberg, 1832), *Paradicranophorus hudsoni* (Glascott, 1893), *Platyias quadricornis* (Ehrenberg, 1832), *Eudactyloa eudactyloa* (Gosse, 1886), *Gastropus hyptopus* (Ehrenberg, 1838), *Conochilus unicornis* (Rousselet, 1892). Хвататели-всасыватели родов *Cephalodella*, *Trichocerca*. Первичные фильтраторы: *Bosmina longi-*

rostris (Muller, 1776) и *Ceriodaphnia quadrangula* (Muller, 1785). Присутствовали также вторичные фильтраторы: *p. Alona*, *Disparalona rostrata* (Koch, 1841), *Graptoleberis testudinara* (Fischer, 1848), *Pleuroxus truncatus* (Muller, 1785). Хвататели – рачки рода *Thermocyclops* и хвататели-всасыватели – *Asplanchna priodonta* (Gosse, 1850).

Наибольшее разнообразие видов было в зарослях кубышки желтой (20%), наименьшее – в зарослях тростника, элодеи, сальвинии и роголистника (10%). Состав доминирующих комплексов видов, ассоциированных с различными фитоценозами приведен в таблице 2.

Отмечалась высокая численность организмов, обитающих в зарослях макрофитов. Особенно высока численность была у *Gastropus hyptopus* и *Asplanchna priodonta*, последний является одним из массовых видов, часто доминирует по биомассе. Это связано с их хорошей пищевой обеспеченностью, коловратки рода *Asplanchna* могут питаться как фитопланктоном, так и другими коловратками. Количественные характеристики гидробионтов отображены на рисунке 3.

В ассоциациях высших водных растений разных видов складываются различные условия для обитания зоопланктона, и это оказывает существенное влияние на видовое богатство и количественные показатели сообществ, обитающих в разных биотопах, но в пределах одной водной экосистемы. Коэффициент Серенсена-Чекановского выявил невысокую степень сходства видового состава зоопланктона в разных ассоциациях растений и изменялся от 34% до 67%. Наибольшее сходство по составу видов было выявлено для зарослей кубышки желтой и рдеста пронзеннолистного (67%) (рис.4).

Зоопланктон зарослей макрофитов (литораль) отличался по видовому составу от незаросших

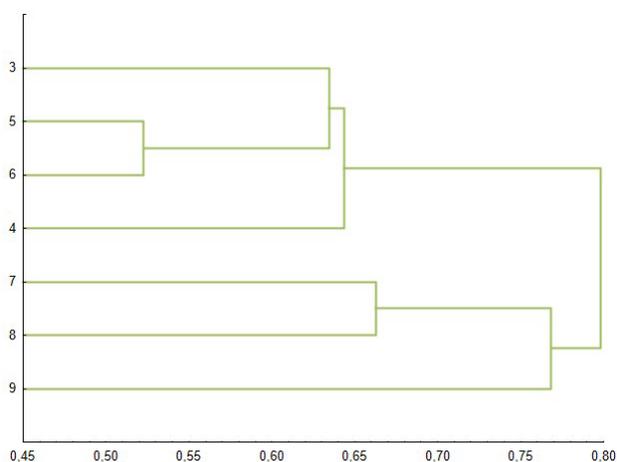


Рис. 4. Дендрограмма видового сходства фитофильного комплекса зоопланктона оз. Илантово. Нумерацию зарослей макрофитов см. на рисунке 3

Fig. 4. Dendrogram of species similarity of the phytophilic zooplankton complex of Ilantovo lake. Numbering of macrophyte thickets as in figure 3

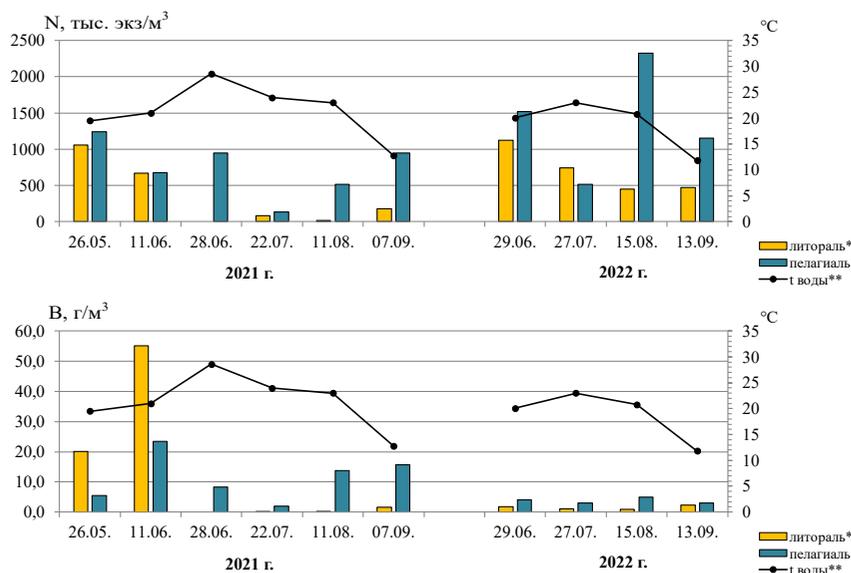


Рис. 5. Сезонная межгодовая динамика численности (N , тыс. экз./ m^3) (а) и биомассы (B , г/ m^3) (б) зоопланктона оз. Илантово

* не отражены количественные показатели от 28.06.2021 г.;

** температура воды в пелагиали – усредненная по всему столбу воды

Fig. 5. Seasonal interannual dynamics of zooplankton abundance (N , ths. sp./ m^3) (a) and biomass (B , g/ m^3) (b) of Ilantovo lake

* quantitative indicators from 28.06.2021 are not reflected;

** water temperature in pelagial – averaged over the whole water column

участков водоёма (пелагиаль). Степень видового сходства организмов составляет 60%. В литоральной части озера обитает 86% (95) от общего числа встреченных за все время исследования видов зоопланктона. В пелагиали – 52% (57 видов). Учитывая этот факт, становится ясной причина отрицательной связи между числом видов зоопланктона и глубиной озера (Семенченко, 2013). Многие авторы напрямую связывают высокое видовое богатство зоопланктона в озере с хорошо развитой водной растительностью (Зимбалевская, 1987; Мухортова, 2007).

В литоральной зоне оз. Илантово создаются особые условия для развития зоопланктона. Высокое функциональное и видовое разнообразие сообщества в мелководной зоне складывается благодаря гетерогенности среды (морфология дна, наличие разнообразной водной растительности). К тому же в литорали сконцентрировано большое количество мальков и молоди рыб, что чаще всего является значимым фактором в распределении зоопланктона в озерных экосистемах (Семенченко, 2013). В открытой части водоёма, пелагиали, показатели температурного и гидрохимического режимов поверхностных и придонных слоев воды отличаются. Наличие даже небольшой глубины в пелагиали приводит к меньшему прогреву воды по сравнению с литоральной частью озера. Имеются данные, которые указывают

на достоверную связь числа видов зоопланктона, обитающего в пелагиали, с прозрачностью, глубиной и площадью озера (Семенченко и др., 2003).

Сезонная динамика количественных показателей зоопланктона была различна. С наступлением благоприятных гидротермических условий весеннего периода в 2021–2022 гг. происходило увеличение численности организмов, начиная со второй половины мая и до второй половины июня во всех рассматриваемых биотопах. Минимум численности приходился на вторую половину июля (рис. 5). В сентябре отмечался осенний подъем численности организмов.

Несмотря на сходную динамику количественных показателей на протяжении вегетационных периодов 2021–2022 гг., между ними есть и существенные отличия. В 2022 г. значения численности и биомассы были чрезвычайно низкими (рис. 5). Вероятно, определенную роль могло сыграть и повышение минерализации воды в озере. В целом, для сообществ зоопланктона оз. Илантово характерны периодические и обычно кратковременные увеличения численности отдельных видов зоопланктона, приводящие к росту суммарных значений количественных показателей. Обычно эти виды являлись доминирующими (табл. 3). Массовые вспышки численности отдельных видов имели место главным образом при повышении температуры воды и в целом характерны для эвтрофных озер.

В литорали озера в 2021 г. можно увидеть ярко выраженную сезонную смену по схеме: коловратки – ветвистоусые – веслоногие рачки. По численности и биомассе обычно доминировали коловратки, среди них наиболее часто встречаемый вид – *A. priodonta*.

В оз. Илантово сильно выражена горизонтальная неоднородность в распределении зоопланктона как по видовому составу, так и по количественным характеристикам. Значения численности и биомассы зоопланктона в литоральной зоне намного ниже, чем в пелагической (рис. 5). Одним из факторов, сдерживающих развитие зоопланктона в литорали, может быть эффект затенения, вызванный макрофитами и ограни-

Таблица 3. Виды-доминанты в оз. Илантово в 2021–2022 гг.
Table 3: Dominant species in Ilantovo lake in 2021–2022

Даты отбора проб Sampling dates	Доминантные виды Dominant species			
	по численности abundance		по биомассе biomass	
	литораль littoral zone	пелагиаль pelagial zone	литораль littoral zone	пелагиаль pelagial zone
2021				
26.05	<i>Keratella cochlearis</i> (39%)	<i>Keratella cochlearis</i> (74%)	<i>Conochilus unicornis</i> (70%)	<i>Conochilus unicornis</i> (55%)
11.06	<i>Conochilus unicornis</i> (30%)	<i>Keratella cochlearis</i> (27%) <i>Nauplii</i> (25%) <i>Conochilus unicornis</i> (21%)	<i>Conochilus unicornis</i> (99%)	<i>Conochilus unicornis</i> (98%)
28.06	–	<i>Gastropus hyptopus</i> (44%)	–	<i>Conochilus unicornis</i> (88%)
22.07	<i>Hexarthra mira</i> (Hudson, 1871) (51%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (40%) <i>Nauplii</i> (25%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (40%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (64%)
11.08	<i>Bosmina longirostris</i> (21%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (27%) <i>Trichocerca cylindrica</i> (25%)	<i>Polyphemus pediculus</i> (Linnaeus, 1761) (38%)	<i>Conochilus unicornis</i> (79%)
07.09	Copepoditii (I) (34%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (40%)	<i>Euchlanis dilatata</i> (Ehrenberg, 1832) (35%)	<i>Conochilus unicornis</i> (78%)
2022				
29.06	<i>Keratella cochlearis</i> (29%) <i>Conochiloides natans</i> (30%)	<i>Keratella cochlearis</i> (36%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (73%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (71%)
27.07	<i>Gastropus hyptopus</i> (25%) <i>Keratella cochlearis</i> (20%)	<i>Nauplii</i> (24%)	<i>Polyphemus pediculus</i> (54%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (57%)
15.08	<i>Nauplii</i> (38%)	<i>Keratella cochlearis</i> (48%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (34%) <i>Trichocerca similis</i> (25%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (76%)
13.09	<i>Asplanchna priodonta</i> (35%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (35%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (84%)	<i>Asplanchna priodonta</i> (84%)

Примечание: в скобках указан вклад вида в общую численность и биомассу; – не исследовались
Note: the contribution of the species to total abundance and biomass is given in parentheses; – not investigated

чивающий рост фитопланктона. Поэтому в литорали для коловраток, питающихся бактериями и водорослями, и рачков-фильтратов может быть меньше корма. Кроме того, рыбное население литоральной зоны может являться решающим биотическим фактором, определяющим динамику структурных показателей сообщества зоопланктона (Семенченко, 2013).

Оценка сложности структуры сообществ гидробионтов проводилась с использованием индекса видового разнообразия Шеннона. Различия в значениях индекса в разные даты более выражены для пелагиали, чем для литорали. Меньшие его значения характерны для пелагической части озера. Величина индекса Шеннона снижается по мере увеличения трофности водоема (по классификации С.П. Китаева), это было особенно характерно для летних месяцев, когда наблюдалось

массовое развитие отдельных видов. В это время отмечалось снижение индекса видового разнообразия, который учитывает выравненность видов. Сообщество зоопланктона в литорали более разнообразно, а структура более выровнена, что подтверждается и более высокими значениями индекса Шеннона (рис. 6).

Индекс доминирования Симпсона в 2021–2022 гг. во всех исследуемых биотопах был высоким, что обусловлено преобладанием нескольких видов. Исключением является май 2021 г., когда в пелагиали абсолютным монодоминантом выступала коловратка *Keratella cochlearis* (74%) (табл. 3).

Заключение

Озеро Илантово – мелководный, заболачивающийся и зарастающий водоем. Вода в озере

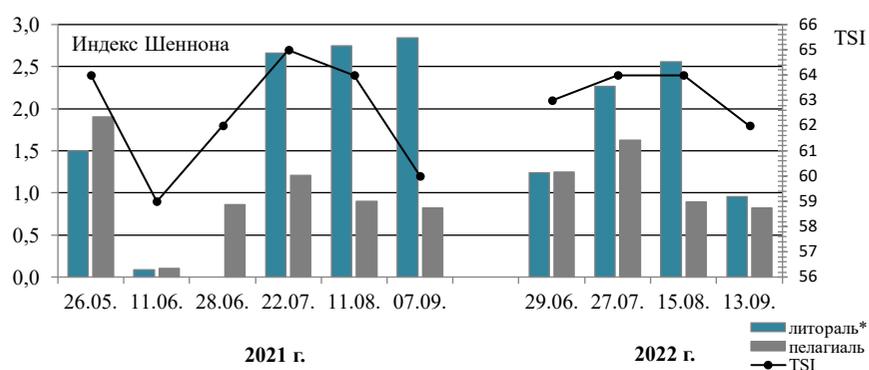


Рис. 6. Изменение значений индекса Шеннона и индекса Карлсона (TSI) в оз. Илантово

* не отражены количественные показатели от 28.06.2021 г.

Fig. 6. Variation of Shannon and Carlson indices (TSI) values in Ilantovo lake

* quantitative indices from 28.06.2021 are not reflected

относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу с невысокой минерализацией, нормальным насыщением кислорода и нейтральной реакцией среды на протяжении большей части вегетационного периода. В придонных слоях воды отмечаются превышения предельно допустимых концентраций органических веществ, ионов аммония, фосфатов, а также марганца, меди и железа. По соотношению N/P и концентрациям в воде соединений азота и фосфора, а также по величине индекса Карлсона оз. Илантово характеризуется как эвтрофный водоем.

В зоопланктоне озера за период исследований (2019-2022 гг.) было выявлено 110 видов зоопланктона, из них Rotifera – 74 вида, Cladocera – 24 вида и 12 видов Copepoda. Высокое видовое богатство зоопланктона озера обусловлено его мелководностью, наличием зарослей высшей водной растительности и благоприятными гидротермическими условиями. Наиболее часто доминировали *Asplanchna priodonta*, *Conochilus unicornis* и *Keratella cochlearis*.

Зоопланктон зарослей макрофитов более разнообразен по составу, по сравнению с открытой частью акватории. В литоральной зоне озера обитает 86% от общего числа выявленных видов, в пелагиали – 52%. Кроме того, в зарослях разных видов макрофитов отмечено неодинаковое число видов зоопланктона, состав видов также различался. Наибольшее их разнообразие характерно для зарослей кубышки желтой (20%), наименьшее – для тростника, элодеи, сальвинии и роголистника (10%). Сходство состава зоопланктона, обитающего в зарослях разных видов макрофитов варьирует от 34% до 67%.

Анализ динамики количественных показателей зоопланктона в течение вегетационного периода показал, что их рост происходит по мере

наступления благоприятных гидротермических условий: со второй половины мая до второй половины июня. Минимум численности приходился на вторую половину июля. В сентябре отмечался осенний подъем численности и биомассы организмов. По величине биомассы зоопланктона оз. Илантово относится к эвтрофному типу.

Рост количественных показателей зоопланктона в пелагиали озера по сравнению с мелководными участками обусловлен средоформирующей функцией макрофитов: в литорали они создают эффект затенения, там снижается прозрачность воды и возможен пресс со стороны рыб. Одновременно в пелагиали были выявлены низкие значения индекса видового разнообразия, что связано с невысоким видовым богатством зоопланктона в придонных горизонтах вод, периодическим увеличением численности одного из видов, моно- доминированием.

Список литературы

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 442 с.
2. Алексеев В.Р., Глаголев С.М., Добрынина Т.И., Котов А.А., Кутикова Л.А., Мазей Ю.А., Малявин С.А., Наумова Е.Ю., Синев А.Ю., Смирнов Н.Н., Степанова Л.А., Стойко Т.Г., Сухих Н.М., Телеш И.В., Фефилова Е.Б., Фильчаков В.А. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 495 с.
3. Борисович М.Г., Яковлев В.А. Трофическая структура зоопланктона разнотипных мелководий Волжского и Волжско-Камского плесов Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. 2011. №2. С. 214–227.
4. Зимбалевская Л.Н. Структура и сукцессия литоральных биоценозов днепровских водохранилищ. АН УССР, Ин-т гидробиологии. Киев: Наук. думка, 1987. 203 с.
5. Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н. Структура сообществ зоопланктона озер Волжско-Камского заповедника // Труды Зоологического института РАН. 2016. №3. С. 294–303.
6. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
7. Косова М.В., Деревенская О.Ю., Унковская Е.Н. Экологическое состояние озер Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника на основе биоиндикационного метода // Проблемы экологии Волжского бассейна «ВОЛГА-2021» // Материалы 6 всероссийской научной конференции. Нижний Новгород, 2021. №4. С. 1–3.
8. Кривенкова И.Ф. Значение фитофильного зоопланктона для экосистемы озера Кенон // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2018. №1. С. 60–65. Doi: 10.21209/2500-1701-2018-13- 1-60-65.

9. Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР (Rotatoria). Подкласс Eurotatoria (отряды Ploimida, Monimotrochida, Paedotrochida). Л.: Наука, 1970. 744 с.

10. Макрушин А.В., Кутикова Л.А. Сравнительная оценка методов Пантле и Букка в модификации Сладчека и Зелинки и Марвана для определения степени загрязнения по зоопланктону // Методы биологического анализа пресных вод. Л., 1976. С. 90–94.

11. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: Зоол. ин-т АН СССР – ГосНИОРХ, 1982. 33 с.

12. Мухортова О.В. Видовое разнообразие зоофитоса разнотипных водоемов Самарской области и Татарстана // Актуальные вопросы изучения микро-, мейо- зообентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов // Материалы I Международной школы-конференции. Нижний Новгород: Вектор ТИС, 2007. С. 206–210.

13. Мухортова О.В., Унковская Е.Н. Таксономический состав фитофильного комплекса зоопланктона, формирующегося в макрофитах озер Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (Татарстан) // Известия Пензенского государственного педагогического университета имени В.Г. Белинского. 2012. № 29. С. 159–164.

14. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

15. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И., Бусева Ж.Ф., Палаш А.Л. Зоопланктон литоральной зоны озер разного типа. Минск: Белорусская наука, 2013. 172 с.

16. Семенченко В.П., Сушчя Л.М. Закономерности распределения зоопланктона в литоральной зоне эвтрофного озера // Доклады НАН Беларуси. 2003. № 6. С. 74–76.

17. Тайсин А.С. Озёра Приказанского района, их природные и антропогенные изменения. Казань: Изд-во ТГГПУ, 2006. 167 с.

18. Шерышева Н.Г., Верховцева Н.В., Осипов Г.А., Унковская Е.Н. Бактериобентос пелагиали и зарослей высших водных растений озера Илантово (ВКГПБЗ, Татарстан) // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №1. С. 174–179.

References

1. Alekin O.A. Osnovy gidrokhimii [Basics of hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 442 p.

2. Alekseev V.R., Glagolev S.M., Dobrynina T.I., Kotov A.A., Kutikova L.A., Mazej Yu.A., Malyavin S.A., Naumova E.Yu., Sinev A.Yu., Smirnov N.N., Stepanova L.A., Stojko T.G., Suhikh N.M., Telesh I.V., Fefilova E.B., Fil'chakov V.A. Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropejskoj Rossii [Determinator of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia]. Vol. 1. Zooplankton. Moskva [Moscow]: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK [KMK Scientific Press Ltd], 2010. 495 p.

3. Borisovich M.G., Yakovlev V.A. Troficheskaya struktura zooplanktona raznotipnykh melkovodij Volzhskogo i Volzhsko-Kamskogo plesov Kujbyshevskogo vodohranilishcha [Trophic structure of zooplankton of different types of shallow waters of the Volga and Volga-Kama splashes of the Kuibyshev reservoir] // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta [Scientific notes of Kazan University]. 2011. № 2. P. 214–227.

4. Zimbalevskaya L.N. Struktura i sukcesiya litoral'nykh biocenozov dneprovskikh vodohranilishch [Structure and succession of littoral biocenoses of Dnieper reservoirs]. Institut gidrobiologii [Institute of Hydrobiology]. Kiev: Naukova dumka, 1987. 203 p.

5. Derevenskaya O.Yu., Unkovskaya E.N. Struktura soob-

shchestv zooplanktona ozer Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Structure of zooplankton communities in lakes of the Volzhsko-Kamsky Reserve] // Trudy Zoologicheskogo instituta RAN [Proceedings of the Zoological Institute RAS]. 2016. №3. P. 294–303.

6. Kitaev S.P. Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznykh prirodnykh zon [Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones]. Moscow: Nauka, 1984. 207 p.

7. Kosova M.V., Derevenskaya O.YU., Unkovskaya E.N. Ekologicheskoe sostoyanie ozer Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika na osnove bioindikacionnom metoda [Ecological state of lakes of the Volzhsko-Kamsky State Natural Biosphere Reserve on the basis of bioindication method] // Problemy ekologii Volzhskogo bassejna «VOLGA-2021» [Problems of ecology of the Volga basin «VOLGA-2021»]. Nizhny Novgorod, 2021. № 4. P. 1–3.

8. Krivenkova I.F. Znachenie fitofil'nogo zooplanktona dlya ekosistemy ozera Kenon [Importance of phytophilic zooplankton for the ecosystem of Lake Kenon] // Uchyonye zapiski Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta [Academic Notes of the Transbaikalian State University]. 2018. № 1. P. 60–65. Doi: 10.21209/2500-1701-2018-13-1-60-65.

9. Kutikova L.A. Kolovratki fauny SSSR (Rotatoria). Podklass Eurotatoria (otryady Ploimida, Monimotrochida, Paedotrochida) [Rotifers of the fauna of the USSR (Rotatoria). Subclass Eurotatoria (orders Ploimida, Monimotrochida, Paedotrochida)]. Leningrad: Nauka, 1970. 744 p.

10. Makrushin A.V., Kutikova L.A. Sravnitel'naya ocenka metodov Pantle i Bukka v modifikacii Sladcheka i Zelinki i Marvana dlya opredeleniya stepeni zagryazneniya po zooplanktonu [Comparative evaluation of the Pantle and Bucca methods modified by Sladeczek and Zelinka and Marwan for determining the degree of pollution by zooplankton] // Metody biologicheskogo analiza presnykh vod [Methods of biological analysis of fresh water]. Leningrad, 1976. P. 90–94.

11. Metodicheskie rekomendacii po sboru i obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniyakh na presnovodnykh vodoemakh [Methodological recommendations on collection and processing of materials for hydrobiological research in freshwater bodies]. Zooplankton i ego produkcija [Zooplankton and its production]. Leningrad, 1982. 33 p.

12. Muhortova O.V. Vidovoe raznoobrazie zoofitosa raznotipnykh vodoemov Samarskoj oblasti i Tatarstana [Species diversity of zoophytes of different types of water bodies of Samara region and Tatarstan] // Aktual'nye voprosy izucheniya mikro-, mejo- zoobentosa i fauny zaroslej presnovodnykh vodoemov [Actual issues of studying micro-, meio- and zoobenthos and fauna of freshwater bodies' thickets]. Nizhny Novgorod, 2007. P. 206–210.

13. Muhortova O.V., Unkovskaya E.N. Taksonomicheskij sostav fitofil'nogo kompleksa zooplanktona, formiruyushchegosya v makrofitakh ozer Volzhsko-Kamskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika (Tatarstan) [Taxonomic composition of phytophilic zooplankton formed in the macrophytes of the lakes of the Volga-Kama State Biosphere Reserve (Tatarstan)] // Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni V. G. Belinskogo [Izvestia Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky]. 2012. № 29. P. 159–164.

14. RD 52.24.643-2002. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Method of complex assessment of surface water pollution degree by hydrochemical indicators].

15. Semenchenko V.P., Razluc'kij V.I., Buseva Zh.F., Palash A.L. Zooplankton litoral'noj zony ozer raznogo tipa [Zooplankton of littoral zone of lakes of different types]. Минск: Belorusskaya nauka, 2013. 172 p.

16. Semenchenko V.P., Sushchenya L.M. Zakonomernosti raspredeleniya zooplanktona v litoral'noj zone evtrofnogo ozera [Regularities of zooplankton distribution in the littoral zone of a eutrophic lake] // Doklady NAN Belarus [Reports of the National Academy of Sciences of Belarus]. 2003. № 6. P. 74–76.

17. Tajsin A.S. Ozyora Prikazanskogo rajona, ih prirodnye i antropogennye izmeneniya [Lakes of Prikazansky district, their natural and anthropogenic changes]. Kazan' [Kazan], 2006. 167 p.

18. Sherysheva N.G., Verhovceva N.V., Osipov G.A., Unkovskaya E.N. Bakteriobentos pelagiali i zaroslej vysshih vodnyh rastenij ozera Ilantovo (VKGPBZ, Tatarstan) [Bacteriobenthos of pelagial and thickets of higher aquatic plants of Lake Ilantovo (VKSNBZ, Tatarstan)] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [News of Samara scientific center of the RAS]. 2011. No 1. P. 174–179.

Kosova M.V., Derevenskaya O.Yu., Unkovskaya E.N., Shurmina N.V., Mukhametzyanova F.M. **Seasonal and interannual dynamics of zooplankton community characteristics of an overgrowing water body (on the example of Ilantovo lake of the Volzhko-Kamsky Reserve).**

This article presents the results of seasonal hydrochemical and hydrobiological studies of Ilantovo

lake, located on the territory of the the Volzhko-Kamsky State Natural Biosphere Reserve. The researchers examined the distribution of invertebrate organisms in different areas of the lake, specifically the littoral and pelagic zone. They also explored the influence of higher aquatic vegetation on zooplankton communities and the seasonal variability in their structure. The lake's zooplankton consisted of 110 species, primarily rotifers. There were identified 41 species of phytoplankton in macrophyte thickets. These thickets had different low species similarity among zooplankton communities. The littoral part of the lake showed high species diversity, but low abundance and biomass of zooplankton communities compared to the pelagial part. Significant fluctuations in zooplankton abundance and biomass are caused by mass development of some species, especially under favorable hydrothermal conditions. The index of zooplankton species diversity decreased with an increase in the lake's trophic status.

Keywords: zooplankton; structure; species diversity; higher aquatic vegetation; trophicity; Volzhko-Kamsky 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: 30.10.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 10.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 24.11.2023

Сведения об авторах

Косова Мария Владимировна, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18; младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: mary.burunina96.5@yandex.ru.

Дереvensкая Ольга Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, E-mail: oderevenskaya@mail.ru.

Унковская Елена Николаевна, старший научный сотрудник, заместитель директора по управлению, экологическому образованию и туризму, ФГБУ «Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник», 422537, Россия, Республика Татарстан, Зеленодольский р-н, пос. Садовый, ул. Вехова, 1, E-mail: l-unka@mail.ru.

Шурмина Надежда Васильевна, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: schurmina2015@yandex.ru.

Мухаметзянова Фания Максимовна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: fania2691@gmail.com.

Information about the authors

Mariya V. Kosova, Postgraduate Student, Kazan (Volga) Federal University, 18, Kremlyovskaya Street, Kazan, 420008, Russia; Junior Researcher, Research Institute for Problem of Ecology and Mineral Water Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: mary.burunina96.5@yandex.ru.

Olga Yu. Derevenskaya, D.Sc. in Biology, Professor, Kazan (Volga) Federal University, 18, Kremlyovskaya St. Kazan, 420008, Russia, E-mail: oderevenskaya@mail.ru.

Elena N. Unkovskaya, Senior Researcher, Deputy Director for Management, Environmental Education and Tourism, Volzhko-Kamsky State Reserve, 1, Vekhova st, Sadvy vil., Zelenodolsky district, Republic of Tatarstan, 422537, Russia, E-mail: l-unka@mail.ru.

Nadezhda V. Shurmina, Researcher, Research Institute for Problem of Ecology and Mineral Water Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: schurmina2015@yandex.ru.

Faniya M. Mukhametzyanova, Junior Researcher, Research Institute for Problem of Ecology and Mineral Water Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: fania2691@gmail.com.



ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАНТОВ НА ПОДВИЖНОСТЬ КАДМИЯ В ПОЧВАХ

В работе представлены результаты исследований содержания валовых и подвижных форм кадмия в дерново-подзолистых почвах, удобряемых высокими нормами жидкой фракции навозных стоков, и в почве контрольных участков. Содержание валового Cd в почве контрольных участков составляло 0.01–0.04 мг/кг, а в обрабатываемых почвах 0.09–0.10 мг/кг, что свидетельствует о его накоплении в корнеобитаемом слое. Для сельскохозяйственных почв характерно и более высокое содержание подвижного Cd. В лабораторном эксперименте изучено влияние известняковой муки и фосфоритов Верхнекамских бедных на подвижность Cd в разных по кислотности и содержанию органического вещества почвах. Установлено, что оба мелиоранта не оказывают существенного влияния на накопление подвижных форм кадмия, однако в образцах почвы с добавкой известняковой муки отмечалась тенденция к переходу Cd в подвижную форму. Через 8 недель после внесения добавок содержание подвижного Cd в образцах почвы с добавкой фосфоритов была ниже, чем в почве с добавкой известняковой муки. Полученные результаты показывают, что выбор мелиорантов для реабилитации загрязненных Cd почв имеет принципиальное значение.

Ключевые слова: навозные стоки; почвы; дерново-подзолистые почвыагро; кадмий, фосфориты Верхнекамские бедные; известняковая мука; почвенные мелиоранты.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.60.66>

Введение

Кадмий входит в число наиболее токсичных тяжелых металлов (ТМ), представляющих значительную опасность для нормального развития и функционирования любых живых организмов. Механизм токсического действия Cd связан со способностью данного элемента необратимо ингибировать различные ферменты. Для Cd характерна высокая мобильность в природных средах, интенсивная биоаккумуляция, активная передача по пищевым цепям и низкая скорость выведения из органов и тканей. Основным ресурсом Cd в наземных экосистемах является почва (Cadmium ..., 1993), при этом его содержание в почвах тесно связано с хозяйственной деятельностью человека (Пилип и др., 2021; Силков, 2011). К ведущим источникам техногенного загрязнения окружающей среды этим металлом относят металлургические предприятия, тепловые электростанции, автотранспорт, производство электронных, полупроводниковых и электротехнических изделий, а также фосфорные удобрения, сырьем для которых служит богатая кадмием руда. Казалось бы, сельское хозяйство и животноводческие комплексы вносят незначительный вклад в загрязнение окружающей среды кадмием (Wu et al., 2012),

однако современное животноводство имеет свои особенности. Переход на промышленную основу привел к созданию крупных промышленных агрокомплексов, для которых характерна высокая концентрация поголовья на ограниченных площадях. Основное количество образующихся на животноводческих предприятиях навозных стоков (НС) чаще всего обезвреживают и в качестве удобрений вносят в расположенную поблизости (на расстоянии 5–10 км) пашню (Пилип, Ашихмина, 2017). Результатом подобной деятельности является изменение агрохимических характеристик почв, прежде всего уровня кислотности, содержания органического вещества, фосфора, калия и тяжелых металлов, а также биодоступности соответствующих элементов для растений (Пилип и др., 2023; Сырчина и др., 2022). Навоз сельскохозяйственных животных становится фактором, способствующим мобилизации металлов в почвах за счет процессов комплексообразования, ионного обмена, микробиологического выщелачивания. Особую опасность для окружающей среды представляет повышение мобильности таких токсичных элементов, включая Cd. Защита почв от кадмиевого загрязнения и ограничение подвижности этого элемента в почвах сельскохо-

зяйственного назначения входит в число наиболее важных и актуальных проблем современной экологии и агроэкологии.

Иммобилизации металлов в почвах способствует внесение известковых удобрений, фосфоритной муки (ФМ), сорбентов и других агрохимикатов, связывающих их в малорастворимые соединения (Волошин, Глазьев, 2003; Приемы повышения ..., 2021). Вместе с тем, применение некоторых агрохимикатов часто ограничено тем, что они сами являются источниками металлов. В частности, повышенное содержание Cd характерно для природных фосфоритов и известняков многих месторождений (Занин и др., 2000; Шумакова, 2011).

Анализ складывающейся ситуации показывает, что поиск новых эффективных и экологически безопасных натуральных мелиорантов для иммобилизации Cd в почвах является актуальной и практически значимой задачей.

Цель настоящей работы состояла в сравнительной оценке влияния фосфоритов Верхнекамских бедных и известняковой муки на содержание подвижных форм кадмия в пахотных почвах.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовали образцы фосфоритов Верхнекамских бедных (ФВБ), соответствующих ТУ 08.91.19-002-85629294-2020 и муку известняковую (МИ), производимую по ГОСТ 26826-86. Известняковая мука относится к традиционным почвенным мелиорантам, широко используемым для повышения плодородия почв. В отличие от МИ, ФВБ являются новым и недостаточно изученным агрохимикатом. Интерес к использованию ФВБ в качестве почвенных мелиорантов обусловлен особенностями их химического и минералогического состава, а также низким содержанием Cd и других токсичных элементов. Сырьем для производства ФВБ служат хвосты обогащения фосфоритной руды (ХОФ) Вятско-Камского месторождения, складированные на территории хвостохранилища Верхнекамского рудника. Поскольку для обогащения добываемой на месторождении руды применяли только безреагентные физические методы (грохочение и промывка), натуральный состав минеральных компонентов ХОФ полностью сохранился (Сырчина и др., 2020; Хузиахметов и др., 2022). Производство ФВБ осуществляют методом экскавирования ХОФ, таким образом, по составу и свойствам ФВБ и ХОФ практически идентичны. Результаты опубликованных исследований свидетельствуют о том, что ХОФ представляют большой интерес для сельского хозяйства и

могут найти применение в качестве натуральных фосфорно-калийных удобрений или почвенных мелиорантов, способствующих снижению кислотности и иммобилизации ТМ в почве (Корчагин, Романюк, 2011; Bruland, 1992).

Минералогический состав ФВБ представлен глауконитами (до 65%), фосфоритами мелких фракций, кварцевым песком, глинистыми и известковыми материалами. В используемых для проведения исследований образцах ФВБ содержание P_2O_5 составляло $5.8 \pm 0.3\%$, K_2O – $3.2 \pm 0.2\%$; Ca (в пересчете на $CaCO_3$) – $3.8 \pm 0.3\%$; Cd – 0.18 ± 0.02 мг/кг. По физическим характеристикам образцы ФВБ представляли собой однородный мелкозернистый сыпучий материал зеленовато-серого цвета. Для проведения исследований использовали ФВБ в молотом виде, содержание частиц размером < 0.18 мм – 90%.

Состав МИ был представлен карбонатами кальция ($91.2 \pm 1.1\%$) и магния ($6.2 \pm 0.7\%$), содержание Cd составляло 0.21 ± 0.03 мг/кг.

Изучение влияния ФВБ на подвижность Cd проводили на примере 4-х различных образцов дерново-подзолистых среднесуглинистых почвы, существенно различающихся между собой по величине pH и содержанию органического вещества. Именно эти показатели оказывают определяющее влияние на процессы иммобилизации/мобилизации Cd в почвах (Volan et al., 2014).

Точечные пробы почвы отбирали тростевым буром в соответствии с ГОСТ Р 58595–2019 с глубины 0–20 см на 2-х пахотных полях (опыт 1 и опыт 2) и на территориях, незатронутых хозяйственной деятельностью (контроль 1 и контроль 2), расположенных на расстоянии 500 ± 50 м от границ пахотных полей (контроль 1 – зарастающий кустарником участок луга; контроль 2 – опушка леса). Необходимость отбора проб с двух контрольных участков была обусловлена значительным расстоянием между пахотными полями (не менее 15 км). Из точечных проб готовили объединенные пробы, которые использовали для проведения экспериментальных исследований.

Оба пахотных поля находились в непосредственной близости от животноводческих предприятий, не далее 3 км от помещений для содержания животных и лагун для хранения жидкой фракции навозных стоков (ЖНС). Первое поле удобряли откачиваемой из лагун ЖНС крупного рогатого скота (КРС), второе – ЖНС свиноводческого предприятия. Органические удобрения (ЖНС) вносили в пашню в значительных нормах (до 200 м³/га в год) в течение не менее 7 лет. Поля использовали в кормовом севообороте.

Перед проведением исследований образцы

почв просеивали, высушивали до воздушно-сухого состояния и загружали в пластиковые контейнеры. В подготовленную почву вносили добавки МИ и ФВБ, перемешивали, увлажняли дистиллированной водой до влажности $65 \pm 5\%$, накрывали микроперфорированной полипропиленовой пленкой и выдерживали на протяжении всего эксперимента (8 недель) при температуре $21 \pm 2^\circ\text{C}$ в условиях естественного освещения. Масса вносимых в почву МИ и ФВБ составляла 1 г/кг.

Химический анализ почв выполняли перед внесением добавок ФВБ и МИ, а также через 1, 2, 5 и 8 недель после внесения. Эксперимент выполняли в трех повторностях. Содержание органического вещества в почве определяли по ГОСТ 26213-91, $\text{pH}_{\text{КСР}}$ в соответствии с ГОСТ 26483-85, концентрацию Cd по ФР 1.31.2018.31189 «Методика изменений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом» на спектрометре ААС «Спектр-5-4».

Химическое разложение почвы при определении валового содержания Cd осуществляли методом кипячения проб в растворе HNO_3 (1:1) с последующей обработкой суспензии концентрированным раствором H_2O_2 и повторным кипячением. Содержание подвижных форм Cd определяли в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4.8. Полученные результаты статистически обрабатывали в программе Microsoft Excel. Достоверность отличий между вариантами оценивали по t-критерию Стьюдента. В таблицах приведены средние значения и стандартные отклонения измеряемых величин.

Результаты и их обсуждение

По данным литературы, в пахотных почвах Кировской области среднее содержание валового Cd составляет 0.115 ± 0.035 мг/кг, подвижного – 0.060 ± 0.018 мг/кг (Товстик и др., 2018).

Содержание валового (Cd_v) и подвижного (Cd_n)

Таблица 1. Характеристика опытных и контрольных почв
Table 1. Characteristics of experimental and control soils

Показатели Indicators	Опыт 1 Experiment 1	Контроль 1 Control 1	Опыт 2 Experiment 2	Контроль 2 Control 2
Cd_v , мг/кг	$0.090 \pm 0.027^*$	0.007 ± 0.002	$0.095 \pm 0.029^*$	0.038 ± 0.011
Cd_n , мг/кг	$0.067 \pm 0.020^*$	< 0.001	$0.076 \pm 0.025^*$	< 0.001
$\text{pH}_{\text{КСР}}$, ед. pH	6.7 ± 0.1	5.3 ± 0.1	4.8 ± 0.1	4.2 ± 0.1
Органическое вещество, %	$6.6 \pm 0.7^*$	2.5 ± 0.5	$4.5 \pm 0.7^*$	2.3 ± 0.5
Частицы < 0.01 мм, %	$36 \pm 3^*$	34 ± 2	$35 \pm 2^*$	33 ± 2

*статистически значимые различия между опытом и контролем ($P > 0.95$)

*statistically significant differences between experiment and control ($P > 0.95$)

кадмия в удобряемых ЖНС почвах существенно отличается от его содержания в почвах контрольных участков (табл. 1).

Содержание Cd_v в почвах, удобряемых ЖНС КРС, было почти в 13 раз выше, чем в почвах контрольного участка, однако находилось в пределах ОДК. В почвах, удобряемых ЖНС свиноферм, содержание Cd_v было не ниже, чем в почве, удобряемой ЖНС КРС. Поскольку поля удобряли только ЖНС, а минеральные удобрения и МИ в почву не вносили, можно предположить, что основным источником Cd были ЖНС. Соответствующее предположение в определенной степени подтверждается высоким значением коэффициента корреляции между массовой долей органического вещества в почвах и содержанием валового кадмия ($r=0.83$). Известно, что содержание Cd в навозных стоках варьирует в широких пределах и в среднем пересчете на сухое вещество составля-

ет 0.36 мг/кг для свиных НС и 0.34 мг/кг для НС КРС (Лукин, Селюкова, 2016).

Содержание подвижных форм Cd в пахотных почвах было также выше, чем на контрольных участках. В подвижной форме находилось до 70–80% валового кадмия.

Внесение в почву добавок МИ привело к повышению $\text{pH}_{\text{КСР}}$, а внесение ФВБ заметного влияния на обменную кислотность почвы не оказало. Динамика изменения водородного показателя почвы с добавками ФВБ и МИ представлена в таблице 2.

В таблице 3 приведены данные о влиянии добавок ФВБ и МИ на динамику содержания подвижного кадмия в почвах.

Полученные результаты показали, что ФВБ и МИ в изученных дозировках не оказывают существенного влияния на содержание Cd_n в почвах. Вместе с тем, если в почвах контрольных участков концентрации подвижных форм кадмия до

Таблица 2. Динамика изменения pH почвы с добавками ФВБ и МИ
 Table 2. Dynamics of pH in soil with additives of phosphorites of the Verkhnekamsky poor (PVP) and limestone flour (LF)

Периоды отбора проб Sampling periods	Опыт 1 Experiment 1		Контроль 1 Control 1		Опыт 2 Experiment 2		Контроль 2 Control 2	
	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF
До внесения добавок	6,7±0,1		5,3±0,1		4,8±0,1		4,2±0,1	
1 неделя	6.7±0.2	7.2±0.2*	5.5±0.2	6.4±0.2*	5.0±0.1	5.6±0.1*	4.6±0.1	5.0±0.1*
2 недели	6.8±0.2	7.4±0.1*	5.4±0.1	6.5±0.2*	5.2±0.2	5.8±0.2*	4.6±0.1	5.2±0.1*
5 недель	6.8±0.2	7.2±0.2	5.5±0.1	5.9±0.2*	4.9±0.1	5.4±0.1*	4.4±0.1	5.0±0.1*
8 недель	6.7±0.1	7.2±0.2*	5.4±0.1	5.8±0.2*	4.9±0.1	5.2±0.1*	4.2±0.1	4.8±0.1*

*статистически значимые различия между вариантами с добавкой ФВБ и МИ (P > 0.95)

*statistically significant differences between variants with the addition of FVB and MI (P > 0.95)

внесения добавок находились ниже предела обнаружения, то в присутствии МИ подвижный кадмий хорошо определялся. Через 8 недель после внесения добавок содержание подвижного Cd во всех образцах почвы с добавкой ФВБ было ниже, чем в почве с добавкой МИ (различия статистически значимы, кроме опыта 2).

Экспериментальные результаты можно объяснить на основе механизмов мобилизации и иммобилизации Cd. Внесение МИ способствует повышению pH почвенного раствора, что приводит к депротонированию гумусовых кислот и повышению устойчивости гуматных и фульватных комплексов Cd. За счет мобильных фульватных комплексов катионы Cd переходят в подвижную форму. Кроме фульвокислот, водорастворимые комплексные соединения с катионами Cd²⁺ могут образовывать органические вещества (в частно-

сти, органические кислоты), вносимые в почву в составе навозных стоков. Известно, что для кадмия характерно образование широкого спектра разнообразных растворимых комплексов с органическими лигандами, повышающими его мобильность в окружающей среде (Naidu, Harter, 1998; Путилина и др., 2009).

Механизмы воздействия ФВБ на процессы иммобилизации/мобилизации Cd в почвах более сложные. Входящий в состав ФВБ глауконит способен связывать катионы Cd²⁺ не только за счет адсорбции на поверхности алюмосиликатов, но и за счет ионного обмена или адсорбции на гидроксидах железа, расположенных в виде пятен и вкраплений на поверхности зерен глауконита. Активнее всего Cd сорбируется из аквакомплексов. Сорбция связанного с органическими лигандами Cd затруднена, что объясняет незначительный

Таблица 3. Содержание подвижного кадмия в почвах с добавками ФВБ и МИ, мг/кг
 Table 3. Content of mobile cadmium in soils with additives PVP and LF, mg/kg

Периоды отбора проб Sampling periods	Опыт 1 Experiment 1		Контроль 1 Control 1		Опыт 2 Experiment 2		Контроль 2 Control 2	
	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF	ФВБ PVP	МИ LF
До внесения добавок	0.067±0.020		<0.001		0.076±0.025		<0.001	
1 неделя	0.052±0.016	0.071±0.021	<0.001	0.082±0.037*	0.058±0.017	0.074±0.022	<0.001	0.060±0.018*
2 недели	0.055±0.017	0.128±0.038	<0.001	0.054±0.016*	0.052±0.015	0.076±0.023	<0.001	0.076±0.020*
5 недель	0.052±0.016	0.120±0.034	<0.001	0.060±0.018*	0.050±0.015	0.072±0.022	<0.001	0.074±0.020*
8 недель	0.050±0.016	0.118±0.035*	<0.001	0.068±0.020*	0.049±0.011	0.065±0.02	<0.001	0.071±0.018*

*статистически значимые различия между вариантами с добавкой ФВБ и МИ (P > 0.95)

*statistically significant differences between variants with the addition of FVB and MI (P > 0.95)

эффект его иммобилизации ФВБ. Определенный вклад в иммобилизацию Cd могут вносить и содержащиеся в ФВБ фосфаты, образующие с ним малорастворимые соединения (Аскарова, 2017).

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что регулярное и длительное внесение побочных продуктов животноводства в пахотные почвы приводит к изменению их химического состава, накоплению органического вещества, подкислению реакции среды, а также к повышению содержания валовых и подвижных форм кадмия.

Для предотвращения химической деградации почв под влиянием высоких норм внесения побочных продуктов животноводства необходима организация мониторинга, направленного на выявление динамики содержания валовых и подвижных форм металлов, в течение нескольких лет.

Выбор мелиорантов для реабилитации загрязненных кадмием почв имеет принципиальное значение. Обработка почвы известковыми материалами может привести к увеличению подвижности кадмия. Внесение в почву глауконитсодержащих материалов, в частности фосфоритов Верхнекамских бедных, способствует снижению подвижности металла, однако достигаемый при этом эффект незначителен.

Список литературы

1. Аскарова Д.А., Глебов В.В. Содержание и формы нахождения тяжелых металлов в почвенном слое // *Фундаментальные и прикладные основы сохранения плодородия почвы и получения экологически безопасной продукции растениеводства / Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2017. С. 64–70.
2. Волошин Е.И., Глазьев С.Ю. Кадмий в почвах Средней Сибири // *Агрохимия*. 2003. №5. С. 81–89.
3. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Писарева Г.М. Кадмий, ванадий, цинк фосфоритов в катагенезе // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 374, №2. С. 228–231.
4. Корчагин В.И., Романюк В.Н. Глаукониты и плодородие Воронежских черноземов // *Плодородие*. 2011. №4. С. 42–43.
5. Лукин С.В., Селюкова С.В. Агроэкологическая оценка влияния органических удобрений на микроэлементный состав почв // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. №12. С. 61–65.
6. Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Отходы свиноводческих комплексов – проблемы, пути решения // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем / Материалы докладов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Киров: Вятский государственный университет, 2017. С. 180–183.
7. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Промышленные свиноккомплексы как источники загрязнения окружа-

ющей среды тяжелыми металлами // *Известия Коми научно-центра УрО РАН*. 2021. №5. С. 88–91.

8. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Кузнецов Д.А. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (Cu, Zn) // *Принципы экологии*. 2023. №1. С. 82–89. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>.

9. Приемы повышения плодородия почв (известкование, фосфоритование, гипсование): научно-методические рекомендации. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 116 с.

10. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции // *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы*. 2009. №90. С. 1–155.

11. Силков С.И. Анализ влияния степени загрязнения почвы цинком и кадмием на качество зерна яровой пшеницы // *Достижения науки – агропромышленному производству / Материалы докладов Международной научно-технической конференции*. Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2011. С. 92–97.

12. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Богатырёва Н.Н., Кантор Г.Я. Глаукониты Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. №2. С. 117–122. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-117-122>.

13. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. №3. С. 219–225. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.

14. Товстик Е.В., Березин Г.И., Казакова А.А. Исследование содержания тяжелых металлов в агропочвах Нечерноземной зоны России // *Современные научные исследования и разработки*. 2018. Т. 1, №5. С. 629–633.

15. Хузиахметов Р.Х., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Иванова Н.Н. // *Комплексная переработка природных фосфоритов с использованием щелочных отходов нефтехимического синтеза и газовой серы* // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. №1. С. 174–180. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-102-108>.

16. Шумакова Г.Е. К проблеме принятия управленческих решений по оценке экологичности агропродукции // *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки*. 2011. №1. С. 177–185.

17. Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M.B., Scheckel K. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? // *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 266. P. 141–166.

18. Bruland K.W. Complexation of cadmium by natural organic ligands in the central North Pacific // *Limnology and Oceanography*. 1992. Vol. 37, №5. P. 1008–1017.

19. Cadmium: environmental aspects. World Health Organization. Environmental health criteria, Geneva (1992). // URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39366/9241571357-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения 20.10.2023).

20. Naidu R., Harter R.D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils // *Soil science society of America journal*. 1998. Vol. 62, №3. P. 644–650.

21. Wu L., Tan C., Liu L., Zhu P., Peng C., Luo Y., Christie, P. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure // *Geoderma*. 2012. Vol. 173. P. 224–230.

References

1. Askarova D.A., Glebov V.V. Soderzhanie i formy nakhozhdeniya tyazhelykh metallov v pochvennom sloe [Contents and forms of presence of heavy metals in the soil layer] // *Fundamentalnye i prikladnye osnovy sokhraneniya plodorodiya pochvy i polucheniya ekologicheskii bezopasnoy produktsii rastenievodstva* [Fundamental and applied principles of preserving soil fertility and obtaining environmentally friendly crop products] / *Materialy dokladov*. Ulyanovsk, 2017. P. 64–70.
2. Voloshin E.I., Glazev S.Yu. Kadmiy v pochvakh Sredney Sibiri [Cadmium in soils of the Middle Siberia] // *Agrokimiya* [Agrochemistry]. 2003. No 5. P. 81–89.
3. Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Pisareva G.M. Kadmiy, vanadiy, tsink fosforitov v katageneze [Behavior of cadmium, vanadium, and zinc in phosphorites during catagenesis] // *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2000. Vol. 374. P. 1136–1138.
4. Korchagin V.I., Romanyuk V.N. Glaukonity i plodorodie Voronezhskikh chernozemov [Glauconites and the fertility of Voronezh chernozems] // *Plodorodie* [Fertility]. 2011. No 4. P. 42–43.
5. Lukin S.V., Selyukova S.V. Agroekologicheskaya otsenka vliyaniya organicheskikh udobreniy na mikroelementnyy sostav pochv [Agroecological assessment of the influence of organic fertilizers on the microelement composition of soil] // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology in agro-industrial complex]. 2016. No 12. P. 61–65.
6. Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Otkhody svinovodcheskikh kompleksov - problemy, puti resheniya [Waste from pig complexes – problems, solutions] // *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem* [Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems] / *Materialy dokladov*. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2017. P. 180–183.
7. Pilip L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. Promyshlennyye svinokomplekсы kak istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami [Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals] // *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi science center of the Ural division of the Russian Academy of Sciences]. 2021. No 5. P. 88–91.
8. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Zhivotnovodcheskie komplekсы kak istochniki zagryazneniya okruzhayushchey sredy tyazhelymi metallami (Cu, Zn) [Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn)] // *Printsipy ekologii* [Principles of the ecology]. 2023. No 1. P. 82–89. <https://doi.org/10.15393/jl.art.2023.13182>.
9. Priemy povysheniya plodorodiya pochv (izvestkovanie, fosforitovanie, gipsovaniye): nauchno-metodicheskie rekomendatsii [Techniques for increasing soil fertility (liming, phosphorite treatment, gypsum): scientific method. rec.]. Moscow, 2021. 116 p.
10. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Kharakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii. Literaturny [Adsorption of heavy metals by soils and rocks sorbent characteristics, conditions, parameters and adsorption mechanisms] // *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy Ecology* [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2009. Vol. 90. P. 1–155.
11. Silkov S.I. Analiz vliyaniya stepeni zagryazneniya pochvy tsinkom i kadmiem na kachestvo zerna yarovoy pshenitsy [Analysis of the influence of the degree of soil contamination with zinc and cadmium on the quality of spring wheat grain] // *Achievements of science - agro-industrial production / Materialy dokladov*. Chelyabinsk, 2011. P. 92–97.
12. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Glaukonity Vyatsko-Kamskogo fosforitonosnogo basseyna [Glauconites of the Vyatka-Kama phosphorite-bearing basin] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2020. No 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-117-122>.
13. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Khimicheskaya degradatsiya zemel pod vozdeystviem otkhodov zhitovnovodstva [Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2022. No 3. P. 219–225. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>.
14. Tovstik E.V., Berezin G.I., Kazakova A.A. Issledovanie soderzhaniya tyazhelykh metallov v agropochvakh Nechernozemnoy zony Rossii [Investigation of the content of heavy metals in agricultural soils of the Non-Chernozem zone of Russia] // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki* [Modern scientific research and development]. 2018. Vol. 1, No 5. P. 629–633.
15. Khuziakmetov R.Kh., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Ivanova N.N. // Kompleksnaya pererabotka prirodnykh fosforitov s ispolzovaniem shchelochnykh otkhodov neftekhimicheskogo sinteza i gazovoy sery [Complex processing of natural phosphorites using alkaline wastes of petrochemical synthesis and gas sulfur] // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology]. 2022. No 1. P. 174–180. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-102-108>.
16. Shumakova G.E. K probleme prinyatiya upravlencheskikh resheniy po otsenke ekologichnosti agroproduksii [The problem of taking managerial decisions about the assessment of eco-friendliness of agricultural products] // *Gosudarstvennoe i munitsipalnoe upravlenie. Uchenyye zapiski* [State and municipal administration. Scientific notes]. 2011. No 1. P. 177–185.
17. Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M. B., Scheckel K. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? // *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 266. P. 141–166. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>.
18. Bruland K.W. Complexation of cadmium by natural organic ligands in the central North Pacific // *Limnology and Oceanography*. 1992. Vol. 37, No 5. P. 1008–1017. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.5.1008>
19. Cadmium: environmental aspects. World Health Organization. Environmental health criteria, Geneva (1992). // URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39366/9241571357-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed: 20.10.2023).
20. Naidu R., Harter R.D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1998. V. 62. No 3. P. 644–650.
21. Wu L., Tan C., Liu L., Zhu P., Peng C., Luo Y., Christie P. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure // *Geoderma*. 2012. Vol. 173. P. 224–230.

Pilip L.V., Syrchina N.V. Effect of meliorants on cadmium mobility in soils.

The study presents the results of the content of gross and mobile forms of cadmium in agrozems fertilized by high rates of liquid fraction of manure effluents and in the soil of control sites. The mechanical composition of the agrozems and the soil of the control sites was identical – medium loam.

According to the data obtained, the content of gross Cd in the soil of the control plots was 0.01–0.04 mg/kg, and in agrozems 0.09–0.10 mg/kg. The latter indicated the accumulation of Cd in the root horizon of the soil. Agrozems were also characterized by higher content of mobile Cd. In the laboratory experiment we studied the effect of limestone flour and phosphorites of the Verkhnekamsk poor on Cd mobility in soils with different acidity and organic matter content. Neither limestone flour nor phosphorites of the Verkhnekamsk poor had significant effect on the corresponding indicator. However, in soil samples with the addition of limestone flour, there was a certain tendency to transition Cd into an acid-soluble form. 8 weeks after the addition of additives, Cd mobility in all soil samples with the addition of phosphorites of the Verkhnekamsky poor was lower than in the soil with the addition of limestone flour. The results obtained showed that the choice of ameliorants for the rehabilitation of Cd-contaminated soils was of fundamental importance.

Keywords: manure effluents; agrozem; cadmium; mobility; phosphorites of the Verkhnekamsk poor; limestone; soil meliorants.

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: 07.11.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 21.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 05.12.2023

Сведения об авторах

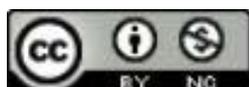
Пилип Лариса Валентиновна, кандидат ветеринарных наук, доцент, Вятский государственный агротехнологический университет, Россия, 610030, г. Киров, Октябрьский пр., 133, E-mail: pilip_larisa@mail.ru.

Сырчина Надежда Викторовна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Вятский государственный университет, Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, 36, E-mail: nvms1956@mail.ru.

Information about the authors

Larisa V. Pilip, Ph.D. in Veterinary, Assistant Professor, Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrsky Av., Kirov, 610030, Russia, E-mail: pilip_larisa@mail.ru.

Nadezhda V. Syrchina, Ph.D. in Chemistry, Senior Researcher, Vyatka State University, 36, St. Moskovskaya, Kirov, 610000, Russia, E-mail: nvms1956@mail.ru.



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 predpriyatiy 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 prirodnyh 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'evoy *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 prirodnyh 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