



2025

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

ISSN 1995-4304 (PRINT)
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

№ 1

Theoretical and
Applied Ecology



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ**

**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ**

**МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

**РЕМЕДИАЦИЯ И
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



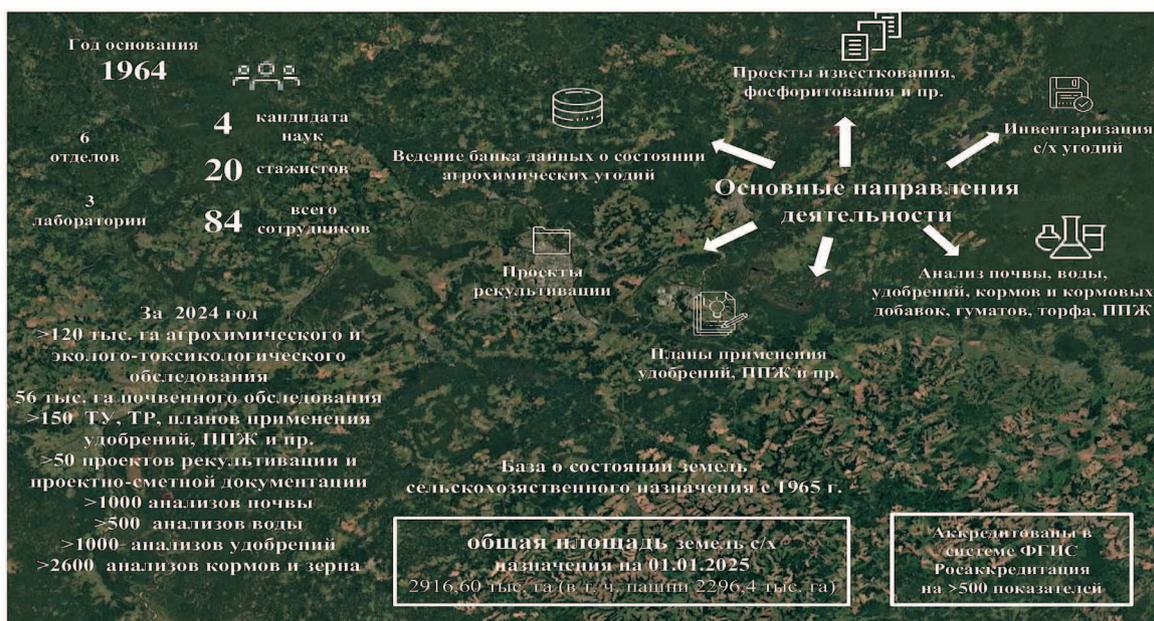
60 лет
на службе
селу!



*В.В. Митин – врио директора
ФГБУ ГЦАС «Кировский»*

Агрохимическая служба Минсельхоза РФ, которой в 2025 г. исполняется 60 лет, проводит полевые агрохимические и эколого-токсикологические обследования сельхозземель и ведёт масштабную деятельность по сохранению плодородия почв. В 1964 г. Кировскую зональную агрохимическую лабораторию организовал и возглавил д. с.-х. наук, академик РАЕН И. Г. Юлушев. По итогам агрохимического обследования почв в 1971 г. практически все хозяйства области получили агрохимические картограммы по кислотности, содержанию подвижного фосфора и обменного калия, а также рекомендации по применению минеральных удобрений на их основе. С целью проведения мониторинга, выявления изменений плодородия почвы, качества и количества сельско-

хозяйственной продукции, предупреждения и устранения негативных процессов, происходящих в окружающей среде, в конце 80-х годов было сформировано 17 реперных участков в различных природно-хозяйственных зонах области, контроль за которыми обеспечивается и в настоящее время. В 1992 г. Кировскую зональную агрохимическую лабораторию объединили с проектно-изыскательской станцией химизации животноводства. На базе созданного учреждения появился отдел анализа кормов и растениеводческой продукции. С 2011 г. и до настоящего времени учреждение преобразовано в ФГБУ ГЦАС «Кировский», включающий в себя два основных центра: агроэкологического мониторинга, проектной работы и ГИС, а также Испытательный центр.





Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 1, 2025
<http://envjournal.ru>

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 2712 по состоянию на 05.02.2025).

Журнал включён в каталог периодических изданий Ульрих (Ulrich's Periodicals Directory), в библиографические базы Scopus (SourceID 21100828916), Web of Science Core Collection, RSCI на платформе WoS, Google Scholar и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал издаётся с 2007 года.

Учредители журнала: ООО ИД «Камертон», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Главный редактор Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Вятского государственного университета, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора С.В. Дёгтева, д.б.н., член-корр. РАН, профессор, директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Зам. главного редактора Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного агротехнологического университета

Зам. главного редактора И.Г. Широких, д.б.н., главный научный сотрудник, зав. лабораторией Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого

Зам. главного редактора Б.И. Кочуров, д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института географии РАН

Ответственный секретарь М.Л. Сазанова, к.б.н., доцент, научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Технические секретари:

Т.И. Кутявина, к.б.н., старший научный сотрудник Вятского государственного университета,

Е.А. Клековкина, к.г.н., доцент

Вятского государственного университета,

В.В. Рутман, младший научный сотрудник Вятского государственного университета

Адрес редакции: 610000, Кировская область, г. Киров, ул. Московская, 36. Тел. (8332) 37-02-77. E-mail: envjournal@vyatsu.ru

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г.

Подписной индекс ПС248 в каталоге «Подписные издания» официального каталога АО «Почта России».

Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 39, тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63. E-mail: info@periodicals.ru; <http://www.periodicals.ru>

Издательство: ООО «О-Краткое»

Адрес издательства: 610020, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, 67.

Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, перевод – Григорий Кантор,

Мария Сазанова, фотография на 4-й обложке – Александр Широких,

администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,

выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»

12+

Дата выхода номера: 25.03.2025.

Тираж 250 экз. Заказ № 0835. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография»

Адрес типографии: 610046, Кировская область,

г. Киров, ул. Труда, 84а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Е.В. Дабах** к.б.н., доцент, старший научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Дородников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- М. Ж. Журинов** д.х.н., академик НАН Республики Казахстан, профессор, президент НАН РК, генеральный директор АО «ИТКЭ имени Д.В. Сокольского»
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, профессор, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного университета
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, главный научный сотрудник Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета
- С.Г. Литвинец** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, директор Института долголетия с клиникой превентивной медицины и реабилитации РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, заслуженный профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- С.А. Рубцова** д.х.н., с.н.с., директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.В. Ширяев** д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 1, 2025

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed journals and issues for publishing the main results of research for PhD and doctoral dissertations.

The journal is included into Ulrich's Periodicals Directory, bibliographic databases Scopus (SourceID 21100828916), Web of Science Core Collection, RSCI on WoS, Google Scholar and Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is published since 2007.

The founders of the journal: Publishing house "Kamerton", Vyatka State University.

Editor-in-Chief T.Ya. Ashikhmina,

Doctor in Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Vyatka State University, Head of Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS

Vice-Editor-in-Chief S.V. Degteva,

Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Professor, Director of FRC Komi SC UB RAS

Vice-Editor-in-Chief L.I. Domracheva,

Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State Agrotechnological University

Vice-Editor-in-Chief I.G. Shirokikh,

Doctor in Biology, Chief Researcher, Head of Laboratory of Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky

Vice-Editor-in-Chief B.I. Kochurov,

Doctor in Geography, Professor, Leading Researcher of the Institute of Geography RAS

Executive Secretary M.L. Sazanova,

PhD in Biology, Associate Professor, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS

Technical Secretaries:

T.I. Kutyavina, PhD in Biology,

Senior Researcher of Vyatka State University,

E.A. Klekovkina, PhD in Geography,

Associate Professor of Vyatka State University

V.V. Rutman, Junior Researcher of Vyatka State University

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing. The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

Editorial Address: 36 Moskovskaya St., Kirov, Kirov region, Russia, 610000 phone/fax: (8332) 37-02-77, e-mail: envjournal@vyatsu.ru

The edition is registered by Federal service for supervision in the sphere of communication, information technology and mass communications. Registration number and date of the decision on registration: series PI No. FS77-74434 on November 23, 2018.

Subscription index PS248 in the joint catalog "Subscription Publications" of Russian Post Service".

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.

Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.

Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98

E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe".

Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610000. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor,

Mariya Sazanova. Photo on the 4st cover – Alexander Shirokikh. Admin-

istrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya

Zelayeva. Director of the publishing house "O-Kratkoe"

Evgeniy Drogov. © Publishing house "O-Kratkoe".

12+

Release date: March 25, 2025.

Circulation 250 copies. Order No. 0835. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD

Printing Address: 84a, Truda St., Kirov, Russia, 610046

THE EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL "THEORETICAL AND APPLIED ECOLOGY"

- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Professor, Scientific Director of FRC Komi SC UB RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- MZh. Zhurinov** Doctor in Chemistry, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, President of NAS RK, General Director of "D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry"
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyyets** Doctor in Biology, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State University
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Chief Researcher of Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Doctor in Biology, Foreign Associate of RAS (China), Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- V.P. Meshalkin** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Director of International Institute of Logistics Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology
- AA. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Director of the Longevity Institute with the Clinic of Preventive Medicine and Rehabilitation of the Russian Scientific Center of Surgery named after Academician B.V. Petrovsky
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Professor Emeritus of Lomonosov Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- F. Scapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)
- V.V. Shiryaev** Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of All-Russian Research Institute of Hunting and Fur Breeding, prof. B.M. Zhitkov
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина, М. Х. Хето Проблемы устранения запахового загрязнения окружающей среды побочными продуктами птицеводства (обзор)6

СТАТЬИ

И. А. Гетманец, Д. Ю. Нохрин, П. В. Левченко Использование многомерного анализа для оценки аллелопатической активности *Quercus robur* L., *Acer plantanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. в естественных и искусственных фитоценозах Южного Урала21

И. А. Усатов, И. С. Труханова, В. Н. Бурканов, А. В. Алтухов Исследование рациона сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) с использованием нейронных сетей компьютерного зрения30

И. В. Гермашев, Е. В. Дербишер, А. И. Новокиёнова, В. Е. Дербишер Оценка состояния водных экосистем с применением нового интегрального индекса возраста40

Ю. А. Буюклян, Ю. В. Закалюкина, А. Р. Белик, В. А. Алферова, И. А. Остерман, М. В. Бирюков Кахакаמיד А – ингибитор ДНК-гиразы, выделенный из нового штамма продуцента *Nocardiosis dassonvillei* T6849

П. В. Кочкарёв, М. А. Перевозчикова, А. А. Сергеев, В. В. Ширяев, В. Н. Пиминов Длина слепого отдела кишечника белой куропатки (*Lagopus lagopus*) на загрязнённых и фоновых территориях севера Красноярского края62

А. В. Манов, Е. А. Робакидзе Состояние древостоев среднетаёжных ельников черничных на автоморфных почвах в зоне воздействия аэротехногенного загрязнения лесопромышленного комплекса (Республика Коми)73

А. С. Петухов, Т. А. Кремлева, Е. Д. Левчук, Н. А. Христовин, Г. А. Петухова Накопление тяжёлых металлов в почвах и листьях берёзы повислой (*Betula pendula*) в условиях загрязнения городской среды83

N. V. Sukhanova, A. I. Fazlutdinova, A. V. Radygina, L. A. Gaysina Transformation of soil cyanobacterial-algal cenoses affected by urbanization in the South Ural urban areas92

И. В. Мискевич, Н. М. Махнович, О. П. Нецветаева Специфика формирования донных биогеоценозов приливных осушек мезоприливных эстуариев Белого моря105

Е. В. Губарь, О. А. Самарина, О. В. Тупицына, В. Н. Пыстин Геоэкологические аспекты устойчивого развития многофункциональных комплексов по обращению с твёрдыми коммунальными отходами111

С. К. Стеценко, Е. М. Андреева, Т. В. Хуришайнен, М. В. Ермакова, А. В. Кучин, Г. Г. Терехов Влияние экстрактивных компонентов древесной зелени ели на рост и развитие семян сосны обыкновенной120

Ю. К. Васильчук, А. П. Гинзбург, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, Дж. Ю. Васильчук Постпирогенные почвы лиственных лесов Чарской котловины (Северное Забайкалье)130

П. А. Стариков, Л. И. Домрачева, А. И. Фокина, А. С. Олькова, Г. Р. Ахмедов, П. Д. Степанов, А. Р. Киреева Возможные пути применения консортивных связей нового штамма *Trichoderma atroviride* с азотфиксаторами в агробиотехнологии140

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

АГРОЭКОЛОГИЯ

АГРОЭКОЛОГИЯ	<i>А. А. Антонов, А. А. Ванькова, Е. Н. Баранова, Л. В. Куренина, Е. В. Платонова</i> Структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных растений томата (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) 151
ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ	<i>Т. А. Трифонова, Ю. Н. Курбатов</i> Изучение физиологических особенностей растений в условиях захоронения нефтепродуктов под слоем почвы 158 <i>А. В. Синдирева, О. А. Зайко, А. К. Мангутова</i> Экологотоксикологическая оценка возможности применения селена для коррекции свинцовой интоксикации у крыс 168
ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ	<i>А. В. Мазеева, А. Г. Татаринов, О. И. Кулакова</i> Структура населения булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionoidea) луговых местообитаний подзоны южной тайги 177 <i>Э. И. Бознак, В. И. Пономарев</i> Максимальный возраст обыкновенного сига в бассейне реки Печоры 187 <i>О. Н. Пересторонина, С. В. Шабалкина, Е. А. Домнина</i> Мониторинг охраняемых видов на территории государственного природного заказника «Бушковский лес» 194 <i>Л. В. Кондакова, Н. В. Сырчина, И. А. Кондакова</i> Специфика почвенной альгоцианофлоры в условиях антропогенного воздействия 202
ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ	<i>Н. П. Неведров, Е. Д. Будаева, В. А. Лукьянов</i> Изменчивость углеродного цикла агроэкосистем в условиях обработки агротёмносерых почв живыми культурами цианобактерий и микроводорослей 210
ИНФОРМАЦИЯ	<i>Г. С. Розенберг</i> Рецензия на монографию Э. Г. Коломыца «Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем в меняющемся климате» ... 220 <i>А. М. Прокашев, Т. Г. Шихова</i> Рецензия на монографию А. Н. Соловьева «Заветные места земли вятской» 224 <i>Н. В. Соколова, Н. В. Носова, Т. Я. Ашихмина</i> Профессиональная ориентация школьников в системе естественнонаучного и географического образования 226

CONTENTS

REVIEWS

<i>N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina, M. H. Kheto</i> Current issues of eliminating odor pollution of the environment by poultry by-products: a review 6
--

ARTICLES

<i>I. A. Getmanets, D. Y. Nokhrin, P. V. Levchenko</i> Assessment of <i>Quercus robur</i> L., <i>Acer plantanoides</i> L., and <i>Ulmus glabra</i> Huds. allelopathic activity in natural and artificial phytocenoses of the Southern Urals using multivariate analysis 21
<i>I. A. Usatov, I. S. Trukhanova, V. N. Burkanov, A. V. Altukhov</i> Steller sea lion <i>Eumetopias jubatus</i> (Schreber, 1776) diet study using computer vision neural networks 30
<i>I. V. Germashev, E. V. Derbisher, A. I. Novokshchyonova, V. E. Derbisher</i> Assessment of the aquatic ecosystem status using the new integral age index 40
<i>J. A. Buyuklyan, Yu. V. Zakalyukina, A. R. Belik, V. A. Alferova, I. A. Osterman, M. V. Biryukov</i> Kahakamide A isolated from <i>Nocardioopsis dassonvillei</i> Tb8 novel strain is a DNA gyrase inhibitor 49
<i>P. V. Kochkarev, M. A. Perevozchikova, A. A. Sergeev, V. V. Shiryaev, V. N. Piminov</i> Length of the willow ptarmigan (<i>Lagopus lagopus</i>) cecum in the Northern Krasnoyarsk Region 62
<i>A. V. Manov, E. A. Robakidze</i> The condition of tree stands in middle taiga <i>Piceetum myrtillosum</i> on automorphic soils in the plots

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

MONITORING OF NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS

**MONITORING OF
NATURAL AND
ANTHROPO-
GENICALLY
DISTURBED AREAS**

affecting by aerotechnogenic pollution from the timber industry complex (the Komi Republic) 73
A. S. Petukhov, T. A. Kremleva, E. D. Levchuk, N. A. Khritokhin, G. A. Petukhova Heavy metal accumulation in soils and leaves of *Betula pendula* in urban pollution conditions 83
N. V. Sukhanova, A. I. Fazlutdinova, A. V. Radygina, L. A. Gaysina Transformation of soil cyanobacterial-algal cenoses affected by urbanization in the South Ural urban areas 92
I. V. Miskevich, N. M. Makhnovich, O. P. Netsvetaeva Specifics of the bottom biogeocenosis formation on tidal flats of the White Sea mesotidal estuaries 105
E. V. Gubar, O. A. Samarina, O. V. Tupicina, V. N. Pystin Geo-ecological aspects of sustainable development of multifunctional complexes for solid municipal waste management 111

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

S. K. Stetsenko, E. M. Andreeva, T. V. Hurshkainen, M. V. Ermakova, A. V. Kuchin, G. G. Terekhov The effect of extractive compounds of spruce greenery on the growth and structural features of *Pinus sylvestris* seedlings 120
Yu. K. Vasil'chuk, A. P. Ginzburg, A. C. Vasil'chuk, N. A. Budantseva, J. Yu. Vasil'chuk Post-pyrogenic soils of the Chara Depression larch forests (North Transbaikalia) 130

AGROECOLOGY

P. A. Starikov, L. I. Domracheva, A. I. Fokina, M. A. S. Olkova, G. R. Akhmedov, P. D. Stepanov, A. R. Kireeva Possible ways of using consortium relations of *Trichoderma atroviride* new strain with nitrogen fixers in agrobiotechnology 140
A. A. Antonov, A. A. Vankova, E. N. Baranova, L. V. Kurenina, E. V. Platonova Transgenic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) rhizosphere bacterial community structure 151

ECOTOXICOLOGY

T. A. Trifonova, Yu. N. Kurbatov The study of the physiological characteristics of plants in the conditions of petroleum products disposal under the soil layer 158
A. V. Sindireva, O. A. Zayko, A. K. Mangutova Ecological and toxicological evaluation of the possibility of selenium application for the correction of lead intoxication in Wistar rats 168

**POPULATION
ECOLOGY**

A. V. Mazeeva, A. G. Tatarinov, O. I. Kulakova The butterfly (Lepidoptera, Rhopalocera) abundance of meadow ecosystems in the southern taiga 177
E. I. Boznak, V. I. Ponomarev Maximum age of *Coregonus lavaretus* in the Pechora River basin 187
O. N. Perestoronina, S. V. Shabalkina, E. A. Domnina Monitoring of protected species on the territory of Bushkovskiy forest State Nature Reserve 194
L. V. Kondakova, N. V. Syrchina, I. A. Kondakova Soil algocyanoflora specificity under anthropogenic pressure 202

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

N. P. Nevedrov, E. D. Budaeva, V. A. Lukyanov Variability of agroecosystem carbon cycle in Grey-Luvic Phaeozems Hortic treated with live cultures of cyanobacteria and microalgae 210

INFORMATION

G. S. Rozenberg Review of the monograph by E. G. Kolomyts "Monitoring of sustainable development of forest ecosystems in a changing climate / ed. by B.I. Kochurov" 220
A.M. Prokashev, T.G. Shikhova Review of the monograph by A. N. Soloviev "Cherished Places of the Vyatka Land" 224
N. V. Sokolova, N. V. Nosova, T. Ya. Ashikhmina Vocational guidance for schoolchildren in the system of natural science and geographical education 226

Проблемы устранения запахового загрязнения окружающей среды побочными продуктами птицеводства (обзор)

© 2025. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с.,

Т. Я. Ашихмина^{1, 2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

М. Х. Хето¹, аспирант,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Функционирование современных птицеводческих предприятий сопровождается образованием значительного количества побочных продуктов, к числу которых относится куриный помёт (КП). Накопление помёта вблизи птицефабрик вызывает запаховое загрязнение сельских территорий. Запахообразующие вещества (ЗОВ) образуются в процессе метаболизма непереваренных остатков корма разнообразными микроорганизмами, попадающими в помёт из кишечника кур и внешней среды. Основной вклад в формирование запаха вносят короткоцепочечные жирные кислоты, летучие соединения серы (H_2S , тиоспирты, тиоэфиры и др.) и азота (NH_3 , биогенные амины и др.). В свежем КП доминируют такие бактерии, как Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, а также грибы *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*. В процессе хранения или компостирования состав микробиоты существенно изменяется, в частности снижается количество Firmicutes и возрастает количество Actinobacteria. Трансформация микробного сообщества сопровождается изменением запаха. Наиболее интенсивным запахом обладает свежий помёт. В настоящее время проводятся активные исследования, направленные на разработку методов дезодорации КП. Большой практический интерес вызывают методы, предполагающие применение микробиологических препаратов, регуляторов кислотности, натуральных сорбентов. Используемые в качестве дезодорантов материалы подавляют продуцирующую ЗОВ гнилостную микробиоту или устраняют неприятный запах за счёт деструкции, иммобилизации, маскировки ЗОВ. В условиях промышленной переработки КП в товарные формы удобрений более удобны химические и физико-химические методы дезодорации. К значительному снижению запаха КП приводит сочетанное воздействие извести (химический реагент) и глауконита (сорбент) с последующим высушиванием смеси. К недостаткам соответствующего метода следует отнести значительные потери азота (в форме NH_3) при разложении солей аммония в щелочной среде. Для предотвращения эмиссии NH_3 в атмосферу можно использовать технологию поглощения этого газа раствором кислоты (например, серной). Образующийся при этом сульфат аммония может найти применение в качестве азотного удобрения.

Ключевые слова: куриный помёт, запах, микробиота кишечника, микробиота помёта, удобрения, дезодорация помёта.

Current issues of eliminating odor pollution of the environment by poultry by-products: a review

© 2025. N. V. Syrchina¹

T. Ya. Ashikhmina^{1, 2}

M. H. Kheto¹

ORCID: 0000-0001-8049-6760^{*}

ORCID: 0000-0003-4919-0047^{*}

ORCID: 0009-0001-7138-4203^{*}

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

acids, volatile sulfur compounds (H_2S , thioalcohols, thioethers, etc.) and nitrogen (NH_3 , biogenic amines, etc.) make the main contribution to odor formation. Such bacteria as Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, as well as fungi *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* dominate in fresh CM. The microbiota composition changes significantly during storage or composting. In particular, the number of Firmicutes decreases and the number of Actinobacteria increases. The microbial community transformation is accompanied by a change in odor. Fresh CM have the most intense odor. Active research is underway to develop methods to deodorize CM. Methods involving the use of microbiological preparations, acidity regulators, and natural sorbents are of greater practical interest. Materials used as deodorants inhibit OFS-producing putrefactive microbiota or eliminate odor by destroying, immobilizing, and masking of OFS. Chemical and physical-chemical methods of deodorization are more convenient for industrial processing of CM into commercial forms of fertilizers. The combined effect of lime (a chemical reagent) and glauconite (a sorbent) followed by drying the mixture leads to a significant reduction of CM odor. The disadvantages of this method include significant losses of nitrogen (in the form of NH_3) during the decomposition of ammonium salts in an alkaline medium. To prevent the NH_3 emission into the atmosphere, it is possible to use the technology of absorption of this gas by an acid solution (for example, sulfuric acid). The ammonium sulfate formed in this way can be used as a nitrogen fertilizer.

Keywords: chicken manure, odor, intestinal microbiota, manure microbiota, fertilizers, manure deodorization.

Производство основной птицеводческой продукции (яиц, мяса) сопровождается образованием значительного количества побочных продуктов, к числу которых относится куриный помёт (КП). На каждый килограмм куриного мяса дополнительно образуется до трёх и более килограмм помёта. Ежедневный выход КП, в зависимости от возраста и группы птицы, варьирует от 175 до 300 г на одну голову (в расчёте на влажность 71–73%) [1]. По имеющимся оценкам, от одной птицефабрики средней мощности (40 тыс. кур несушек или 10 млн цыплят бройлеров) ежегодно поступает от 35 до 83 тыс. т помётной массы. В отсутствие эффективных систем утилизации неиспользуемые объёмы помёта накапливаются вблизи птицеводческих предприятий, что создаёт серьёзную опасность для людей и окружающей среды (ОС) [2]. Особое раздражение населения вызывает крайне неприятный запах, распространяющийся на значительные расстояния от мест складирования и обработки соответствующего побочного продукта. Многие запахообразующие вещества (ЗОВ), источником которых является КП, оказывают непосредственное негативное влияние на здоровье человека. Такие компоненты запаха, как арсин, диметилсульфат, гидразин, метилгидразин позиционируют как потенциальные канцерогены. В исследованиях [3] выявлено, что у людей, живущих вблизи заводов по переработке кур, симптомы рака, хронического бронхита, эмфиземы и заболеваний сердца диагностируются значительно чаще среднего уровня по стране. В связи с активным развитием промышленного птицеводства проблема запахового загрязнения сельских территорий всё более обостряется, а поиск технологических решений, позволяющих снизить эмиссию ЗОВ, приобретает особую актуальность и практическую значимость.

Цель работы – систематизировать, обобщить и критически оценить достижения мировой науки и технологии в решении проблемы устранения запахового загрязнения окружающей среды побочными продуктами птицеводства.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор научной и технической информации, посвящённой проблеме запаха КП. В обзор включены результаты научных исследований, опубликованные в период с 2000 по 2025 гг. Поиск информации осуществляли с помощью сервисов Google Scholar, Scopus, Web of Science, Академия Google, eLIBRARY, КиберЛенинка, «Scholar.ru», ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Для лингвистического моделирования предметного поля использовали следующие поисковые запросы: куриный помёт, побочные продукты животноводства, запах куриного помёта, методы устранения запаха, дезодорация биогенных отходов, а также ключевые слова, приведённые в научных статьях аналогичной тематики. Ключевые слова использовали в англоязычном и русскоязычном вариантах с корректировкой лексического значения терминов. Электронный поиск в международных и национальных базах данных дополняли ручным поиском релевантной информации в книгах, ведущих научных и отраслевых журналах, реферативном журнале (РЖ) ВИНТИ РАН, библиографических списках, материалах конференций и других изданиях. Основное внимание уделено таким вопросам, как состав и условия формирования запаха, способы устранения запаха, дезодорирующие материалы для КП, экологические и экономические аспекты внедрения технологий устранения запаха в практику.

Химический состав куриного помёта

Основу питания кур составляют растительные рационы, обогащаемые дефицитными аминокислотами, минералами, витаминами, ферментами, пребиотиками, пробиотиками и антибиотиками, способствующими улучшению показателей роста и продуктивности [4, 5]. В процессе пищеварения птицы усваивают менее 50% питательных веществ рациона. Непереваренный остаток выводится из организма в виде помёта. На состав помёта заметное влияние оказывают особенности кормления, возраст, производственное назначение птицы, технология содержания, устройство водоподачи, способ удаления и хранения экскрементов [6, 7], в связи с этим сведения о содержании в КП отдельных компонентов, приводимые в разных источниках, могут существенно различаться. Для КП характерно высокое содержание азота, серы и фосфора, что обусловлено особенностями пищеварения птиц, а также сложившейся практикой «перекармливания» кур для максимально быстрого набора массы тела [8]. Основная доля неусвоенного азота экскретируется у птиц в виде непереваренных белков, мочевой кислоты и мочевины. Содержание азотистых соединений в КП достигает 26–38%. Сера содержится в белках и сульфатах. Массовая доля серы обычно составляет 0,4–0,6% от массы сухого вещества КП [9]. Фосфор входит в состав плохо усваиваемых в организме кур фитатов, а также некоторых других органических соединений (нуклеотидов, нуклеиновых кислот, фосфолипидов, эфиров фосфорной кислоты). Около 30% фосфора выводится из организма птиц в минеральной форме [10, 11]. Высокое содержание непереваренных фитатов обусловлено низкой выработкой фермента фитазы. Соответствующий фермент играет ключевую роль в гидролизе моноэфиров фосфорной кислоты [12]. Содержание калия в КП обычно составляет 1,8–3,1%; натрия – 0,5–1,5%; магния – 0,8–1,4%. Кроме макроэлементов КП содержит практически все микроэлементы, включая медь – 0,003–0,009%; железо – 0,01–0,04%; цинк – 0,004–0,06%; марганец – 0,005–0,01%, а также витамины В12, Е, Д, К, рибофлавин, пиридоксин, никотиновую кислоту, каротин [13, 14]. Водородный показатель (рН) КП близок к нейтральным значениям или чуть выше (7–8). Электропроводность варьирует в пределах от 250 до 1230 мСм/м и зависит от массовой доли растворимых солей [15].

Химический состав и свойства КП обеспечивают благоприятные условия для жизнедеятельности разнообразных микроорганизмов-деструкторов, метаболизирующих сложные органические соединения до более простых форм, многие из которых имеют неприятный запах.

Микробиом кишечника кур и его роль в формировании запаха

Желудочно-кишечный тракт кур заселён сложными микробными сообществами, включающими бактерии, грибы, археи, простейшие, вирусы [16]. Наиболее многочисленными являются бактерии, относящиеся к таким таксонам, как Firmicutes, Proteobacteria и Bacteroidetes [17, 18]. В пределах типа Firmicutes наиболее многочисленными являются роды *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Fecalibacterium*, *Butyrivibrio*, *Ethanoligenens*, *Alkaliphillus*, *Butyricicoccus*, *Blautia*, *Hespellia*, *Roseburia* и *Megamonas*, в типе Bacteroidetes – роды *Bacteroides*, *Prevotella*, *Parabacteroides* и *Alistipes* [19]. Состав микробиома существенно зависит от характера рациона и производственной группы птицы. Согласно [20], в кишечнике бройлеров широко представлены *Lactobacillus*, *Enterococcus* (оба рода относятся к типу Firmicutes), *Bacteroides* (тип Bacteroidetes) и *Corynebacterium* (тип Actinobacteria). В кишечном микробиоме кур-несушек наиболее часто встречаются *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Bacteroides*, *Escherichia coli*, *Prevotella*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Megasphaera*, *Fusobacterium* и *Bifidobacterium*.

Самые плотные популяции микроорганизмов (МО) характерны для слепой кишки (кишечник кур содержит 2 слепых отростка), а наименее плотные – для проксимального отдела тонкого кишечника. В микробиоме слепой кишки представлено до 1000 различных видов, принадлежащих к таким типам как Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacteria, Proteobacteria. Два первых типа занимают доминирующее положение (до 90% от общей численности МО). Микробиота толстой кишки формируется за счёт МО, попадающих в этот отдел из слепых отростков и подвздошной кишки [21].

Кроме бактерий в микробиоме кур идентифицировано 88 различных видов грибов, включая *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp. и *Sporidiobolus* spp. [22]. Доминирующее положение занимают представители типов

Ascomycota и Basidiomycota. Наиболее распространённые роды – *Microascus*, *Gibberella*, *Trichosporon*, *Aspergillus*, а также *Candida* и *Fusarium pseudonygamai*. Грибное сообщество, по сравнению с бактериальным, играет в пищеварении кур второстепенную роль [23, 24].

Анаэробные МО кишечника принимают активное участие в метаболизме поступающих с кормом белков и углеводов, в результате чего образуется значительное количество ЗОВ [25]. Ферментация белков анаэробными бактериями в слепых отростках приводит к накоплению биогенных аминов (путресцина, спермидина, спермина и др.), индолов, фенолов, крезолов, аммиака [26]. В процессе микробиологической ферментации неперевариваемых углеводов образуются короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК). Согласно результатам выполненных исследований, ацетат, пропионат и бутират являются основными метаболитическими продуктами микробиома птицы [27].

Влияние микробиоты на запах куриного помёта

Населяющие помёт микроорганизмы (МО) играют ключевую роль в формировании характерного неприятного запаха (НЗ). Основу микробиоты КП составляют МО кишечника, способные адаптироваться к условиям внешней среды, а также МО подстилки. В свежем КП доминируют такие бактерии, как Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria [28, 29], а также грибы *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* [30]. Наибольшей численностью и разнообразием отличаются грамположительные бактерии. В процессе хранения или компостирования помёта состав микробиоты существенно изменяется, в частности снижается количество Firmicutes и возрастает количество Actinobacteria [31]. Трансформация микробиоты сопровождается изменением запаха. Наиболее интенсивное выделение NH_3 , H_2S и других летучих органических соединений (ЛОС) происходит из свежего КП, по мере хранения интенсивность запаха снижается [32]. Большое влияние на запах оказывает подстилка, представляющая собой смесь того или иного подстилающего материала (опилок, соломы, сена, торфа, хвои, песка, стружек и др.) с помётом, перьями, остатками корма, кормовых добавок, ветеринарных препаратов, воды [33]. В подстилке могут обитать разнообразные, в том числе патогенные вирусы, бактерии, грибы, простейшие, гельминты, образующие

сложноорганизованные сообщества [34]. Формирование характерного запаха КП в значительной мере связано с бактериями типа Firmicutes (особенно *Bacillus*, *Enterococcus* и *Oceanobacillus*), которые способны секретировать большое количество внеклеточных ферментов, играющих важную роль в деградации белков. Особую опасность представляет NH_3 , выделяющийся при разложении содержащихся в КП азотистых соединений, прежде всего мочевой кислоты и мочевины [35–38].

Среднесуточный выброс NH_3 достигает 130 мг на одну курицу [39]. Повышенное содержание этого газа в воздухе (>25 ppm) приводит не только к запаховому загрязнению, но и к снижению прироста массы тела, выживаемости, иммунитета, ухудшению конверсии корма, увеличению количества погибших птиц [40]. Уровень эмиссии NH_3 из КП зависит от температуры, влажности, вентиляции, возраста птиц, типа подстилки и даже сезона. Ферменты, участвующие в разложении мочевой кислоты и мочевины до NH_3 , широко распространены в природе, поскольку вырабатываются самыми разными группами организмов: животными, растениями, бактериями, грибами [41]. Ключевую роль в общем процессе минерализации азота играют уриказы (ферменты, разлагающие мочевую кислоту) и уреазы (ферменты, разлагающие мочевину) [42, 43]. Продуцентами соответствующих ферментов в КП являются обитающие к нём МО. Уриказы проявляют высокую стабильность в широком интервале pH (5–10) и температур (25–55 °C). Даже нагревание до 70 °C в течение 30 минут не приводит к их инактивации [44, 45]. Нейтральные уреазы, вырабатываемые большинством МО, проявляют максимальную активность при pH 7,0–8,0. Кислые уреазы разлагают мочевину в кислой среде (2,0–4,5) [46, 47]. Активность уреаз возрастает при повышении температуры в интервале 25–55 °C. Увеличение температуры до 60–65 °C сопровождается некоторым снижением их активности. Более сильное нагревание приводит к разрушению белковой структуры и инактивации фермента [48].

Важный вклад в НЗ вносит не только NH_3 , но и другие летучие азотсодержащие соединения, в частности биогенные амины. Декарбоксилазная активность, приводящая к образованию соответствующих соединений, характерна для попадающих в КП из кишечника птиц и внешней среды *Listeria*, *Salmonella*, *Klebsiella*, *Enterococcus*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Morganella*, *Enterobacter*, *Photo-*

bacterium, *Shewanella*, *Vibrio*, *Staphylococcus*, а также некоторых штаммов молочнокислых бактерий: *Lactobacillus fuchuensis*, *Lactococcus piscium*, *Leuconostoc gelidum* и *Carnobacterium alterfunditum*. Гены, связанные с образованием путресцина, переносятся *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae* и *Citrobacter* sp. Важный вклад в образование кадаверина и тирамина вносят *Escherichia coli* и *Klebsiella oxytoca*. Бактерии, обладающие декарбоксилазной активностью, обитают не только в кишечнике, но и на поверхности кожи птицы. К числу таких бактерий относятся представители семейства Enterobacteriaceae (включая *Escherichia coli*, *Pantora* spp., *Serratia marcescens*, *Serratia ligefaciens*, *Serratia* spp., *Proteus vulgaris*, *Klebsiella oxytoca*, *Klebsiella* spp., *Yersinia enterocolitica*), а также штаммы из родов *Aeromonas* spp. и *Pseudomonas* [49–51]. В составе непереваренных остатков пищи, пуха и перьев данные бактерии попадают в КП, где продолжают метаболизировать сложные азотсодержащие соединения до более простых летучих форм.

Эмиссия H_2S , тиолов, тиоэфиров, дисульфидов, трисульфидов, карбонилсульфида, сероуглерода обусловлена анаэробным микробиологическим разложением органических серосодержащих соединений (прежде всего белков). Активное участие в этом процессе принимают *Weissella*, *Leuconostoc*, *Peptococcus*, *Bacteroides*, *Peptoniphilus* [52]. Из всех сероорганических соединений наибольшее влияние на характер запаха оказывает метантиол (метилмеркаптан). Образование соответствующего соединения происходит в процессе анаэробной дегградации цистеина и метионина. Важную роль в продуцировании метантиола играют бактерии рода *Bacillus*. [53]. Следует иметь в виду, что уровень эмиссии серосодержащих ЗОВ из КП может повышаться за счёт восстановления содержащихся в биогенных отходах сульфатов сульфатредуцирующими прокариотами [54–56].

Активное продуцирование КЦЖК в процессе метаболизма пищевых волокон характерно для *Bacteroides* (в частности, *B. theta-iotaomicron*, *B. ovatus*), *Prevotella*, *Fibrobacter*, *Roseburia*, *Fusobacterium* и др. [57, 58]. К ацидогенным бактериям можно также отнести *Bacillus* и *Clostridium* [59].

В разложении лигноцеллюлозы непосредственное участие принимают грибы (*Penicillium expansum*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride* и др.) [60].

Создание условий для подавления численности одних групп МО и стимулирования

других позволяет в значительной степени модифицировать интенсивность и характер запаха [61, 62]. Согласно опубликованным данным, обработка КП препаратами, содержащими комплекс *Pseudomonas fluorescens*, *Enterococcus faecium*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, *Leuconostoc mesenteroides* и *Lactobacillus plantarum*, способствует снижению эмиссии NH_3 и H_2S [63]. Инокулят на основе *Bacillus* оказывает влияние на состав и численность бактериальных и грибных сообществ, в результате чего уменьшаются выбросы NH_3 , но повышаются выбросы H_2S [64]. Инокуляция КП иммобилизованными сероокисляющими бактериями способствует снижению эмиссии H_2S [65]. Сравнительная оценка возможности использования различных МО для удаления таких компонентов запаха, как H_2S , NH_3 , летучие жирные кислоты (ЛЖК), показала, что наилучшие результаты в этом отношении демонстрируют представители родов *Bacillus* и *Pseudomonas*, в частности *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* и *Pseudomonas* sp., а также актиномицеты рода *Streptomyces*. Грамотрицательные бактерии *Flavobacterium* и *Achromobacter* принимают участие в удалении сульфидов, дрожжи *Candida inconspicua* и молочнокислые бактерии *Leuconostoc mesenteroides* достаточно активно метаболизируют аммонийный азот. На метаболизм КЦЖК заметное влияние оказывают *Bacillus* и *Pseudomonas*, а также *Flavobacterium* и *Staphylococcus lentus* [66].

Запах куриного помёта

Запах КП обусловлен эмиссией различных летучих соединений, образовавшихся в организме птицы в процессе пищеварения, а также в результате деструкции непереваренных компонентов пищи во внешней среде. На характер и интенсивность запаха оказывают влияние не только особенности рациона птиц и условия хранения помёта, но и порода кур [67]. Основной вклад в формирование запаха вносят летучие соединения серы (H_2S , тиоспирты, тиоэфиры и др.), азота (NH_3 , биогенные амины и др.) и кислорода (ЛЖК, спирты, кетоны, фенолы и др.) [68, 69]. Соединения фосфора не оказывают существенного влияния на запах, однако в ряде публикаций в качестве компонента запаха КП отмечают токсичный газ фосфин [70, 71]. Технический фосфин имеет крайне неприятный запах, напоминающий запах тухлой рыбы или чеснока. Соответствующее соединение отличается высо-

Таблица 1 / Table 1

Основные компоненты запаха куриного помета / The main components of the chicken manure odor

Вещество / Substance	Характер запаха / Odor character	Порог восприятия, ppm (объёмные) [72] Perception threshold, ppm (volumetric) [72]
Кислородосодержащие соединения / Oxygen-containing compounds		
Метанол / Methanol	Алкольный / Alcoholic	33
Этанол / Ethanol		0,52
Пропанол / Propanol		0,094
n-Бутанол / n-Butanol	Неприятный, резкий, запах сивушного масла / Unpleasant, pungent, fusel oil odor	0,038
Изоамиловый спирт Isoamyl alcohol	Неприятный, навязчивый / Unpleasant, intrusive	0,0017
Геосмин / Geosmin	Землистый / Earthy	0,0000065
Муравьиная кислота Formic acid	Резкий, кислый / Pungent, sour	1–640 мг/м ³ / mg/m ³ [73]
Уксусная кислота Acetic acid		0,0060
Пропионовая кислота Propionic acid		0,0057
Масляная кислота Butyric acid	Резкий запах прогорклого масла Pungent odor of rancid oil	0,00019
Изомасляная кислота Isobutyric acid	Неприятный / прогорклый Unpleasant / rancid	0,0015
Валерьяновая кислота Valerian acid	Очень неприятный, тухлый / Very unpleasant, rotten	0,000037
Изовалериановая кислота Isovaleric acid	Очень неприятный, запах пота, запах старых носков / Very unpleasant, sweat odor, old socks odor	0,000078
Фенол / Phenol	Неприятный, химический, тошнотворно-сладкий / Unpleasant, chemical, sickly-sweet	0,0056
Ацетон / Acetone	Неприятный, резкий, химический Unpleasant, pungent, chemical	42
Бутанон / Butanone	Напоминает запах ацетона / It smells like acetone	0,44
Ацетоин / Acetoin	Выраженный запах сливочного масла или жирной сметаны / Strong odor of butter or heavy cream	6–50 ppm [74]
Диацетил / Diacetyl	Сильный жирный запах сливочного масла, сметаны, прогорклый Strong fatty odor of butter, sour cream, rancid	0,000050
Акролеин / Acrolein	Едкий, неприятный запах подгорелого жира / Pungent, unpleasant odor of burnt fat	0,0036
Серосодержащие соединения / Sulfur-containing compounds		
Сероводород Hydrogen sulfide	Запах тухлых яиц / The odor of rotten eggs	0,00041
Метилмеркаптан Methyl Mercaptan	Резкий неприятный, напоминает запах гнилой капусты или тухлых яиц / Pungent, unpleasant, reminiscent of the odor of rotten cabbage or rotten eggs	0,000070

Вещество / Substance	Характер запаха / Odor character	Порог восприятия, ppm (объёмные) [72] Perception threshold, ppm (volumetric) [72]
Этилмеркаптан Ethyl Mercaptan	Очень неприятный, запах скунса Very unpleasant, skunk odor	0,0000087
n-Пропилмеркаптан n-Propyl Mercaptan	Запах гнилой капусты, гнилого лука / The odor of rotten cabbage, rotten onions	0,000013
Диметилтрисульфид Dimethyltrisulfide	Неприятный, едкий, напоминает запах морепродуктов, варёной капусты, свёклы, лука / Unpleasant, pungent, reminiscent of the odor of seafood, boiled cabbage, beetroot, onion	0,06–8,8 мкг/м ³ / µg/m ³ [75]
Диметилсульфид Dimethyl Sulfide		0,0030
Диметилдисульфид Dimethyl disulfide	Запах резины, гнилого чеснока или лука / Odor of rubber, rotten garlic or onions	0,0020
Азотсодержащие соединения / Nitrogen-containing compounds		
Аммиак / Ammonia	Очень резкий, неприятный / Very pungent, unpleasant	1,5
Метиламин Methylamine	Неприятный, запах рыбы, аммиака Unpleasant, odor of fish, ammonia	0,035
Диметиламин Dimethylamine	Неприятный, запах рыбы, аммиака / Unpleasant, odor of fish, ammonia	0,033
Триметиламин Trimethylamine	Фекальный, рыбный / Fecal, fishy	0,000032
Индол / Indole	Фекальный / Fecal	0,00030
Скатол / Skatole	Фекальный, гнилостный / Fecal, putrid	0,0000056
Пиридин / Pyridine	Резкий, неприятный, напоминает запах испорченной рыбы / Pungent, unpleasant, reminiscent of the odor of spoiled fish	0,063

кой химической активностью и на воздухе самовоспламеняется, что затрудняет его идентификацию в продуктах биотрансформации КП.

В настоящее время идентифицировано более 150 летучих соединений, формирующих запах КП. Данные об основных компонентах запаха приведены в таблице 1.

Дезодорация куриного помёта

Устранение запаха имеет большое значение для обеспечения благоприятных условий работы персонала птицефабрик, улучшения экологической обстановки прилегающих к птицеводческим предприятиям территорий, оптимизации органолептических характеристик помёта, предназначенного для переработки в удобрения. Согласно зарубежным публикациям, запах КП, реализуемого в качестве органического удобрения, оказывает существенное влияние на формирование по-

требительского спроса. Потребители предпочитают землистый запах, который обусловлен накоплением в органических удобрениях геосмина. Геосмин и родственные ему ЛОС продуцируются актиномицетами и цианобактериями в процессе компостирования КП или навоза [76]. Компостирование позволяет не только устранить НЗ, но и значительно улучшить санитарно-гигиенические характеристики КП, однако этот процесс протекает довольно медленно, требует соблюдения определённого температурного режима и значительных площадей для размещения компостируемого материала. Ускорить процесс можно за счёт обработки КП специализированными микробиологическими препаратами (ЭМ-препаратами), содержащими определённые штаммы микроорганизмов-деструкторов [77, 78]. Несмотря на экологичность и эффективность, существующие ЭМ-технологии не позволяют сократить время обработки КП

до приемлемого на промышленных предприятиях уровня. Кроме того, компостирование приводит к значительным потерям наиболее ценного компонента КП – азота [79].

В условиях промышленной переработки КП в товарные формы удобрений более удобны химические и физико-химические методы дезодорации. Основными преимуществами соответствующих методов являются производственная технологичность (приспособленность к производству) и высокая скорость достижения требуемого результата. К недостаткам следует отнести ограниченный перечень пригодных для обработки КП экологически безопасных дезодорирующих материалов и дополнительные затраты на их приобретение; отсутствие универсальных дезодорантов, способных устранять широкий перечень различных по химической природе ЗОВ; значительный расход дезодорирующих добавок; непродолжительный период действия и (в большинстве случаев) необходимость повторных обработок, что обусловлено быстрым восстановлением гнилостной микробиоты в богатой питательными веществами среде [80, 81]. Несмотря на данные недостатки, интерес к поиску эффективных дезодорирующих материалов и композиций не исчезает. В разных странах проводятся исследования по оценке перспектив применения известняка, гипса, цеолита, антибиотиков, перманганата калия, перекиси водорода, хлора, гипохлоритов, кислот (серной, фосфорной, органических), формальдегида, сапонинов юкки, сульфата цинка, ферментов и др. для снижения запаха навоза и помёта [82–85]. Используемые в качестве дезодорантов материалы подавляют продуцирующую ЗОВ гнилостную микробиоту или устраняют НЗ за счёт деструкции, иммобилизации, маскировки ЗОВ. Для снижения активности или устранения гнилостной микробиоты обычно применяют реагенты, проявляющие бактерицидные или бактериостатические свойства, а также регуляторы кислотности [86]. Бактерицидные препараты уничтожают бактерии, бактериостатические – подавляют их рост. Регуляторы кислотности способствуют смещению рН в неблагоприятную для жизнедеятельности МО область (слишком кислую или слишком щелочную), что приводит к замедлению процессов деструкции органических веществ, в результате чего уровень эмиссии ЗОВ снижается.

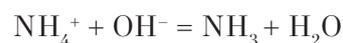
Для подкисления побочных продуктов животноводства обычно используют органические или минеральные кислоты, а также соли Al(III)

и Fe(III). Применение органических кислот или солей сопряжено с меньшими рисками для ОС и персонала предприятий, однако является весьма затратным. Более бюджетный вариант ориентирован на применение минеральных кислот, в частности H_2SO_4 (дешёвая, нелетучая, сильная) [87–89]. Основным недостатком H_2SO_4 , как реагента для обработки побочных продуктов животноводства, является высокая химическая агрессивность, что существенно сдерживает внедрение технологии подкисления в практику животноводства. Для подщелачивания КП чаще всего используется негашёная CaO или гашёная $Ca(OH)_2$ известь [90, 91].

Реакция среды (рН) помёта является важным фактором, регулирующим эмиссию NH_3 , летучих органических кислот (ЛОК), H_2S , а также меркаптанов и тиоэфиров [92]. С одной стороны рН влияет на активность микробиоты и ферментов, расщепляющих органические вещества с образованием летучих соединений, с другой – определяет возможность перехода некоторых ЗОВ в нелетучие формы:



Для кислой среды характерно наличие дурнопахнущих H_2S и ЛОК, в щелочной среде эти соединения образуют нелетучие соли и запах уменьшается. При рН 9 практически весь H_2S переходит в нелетучие формы (сульфиды, гидросульфиды). Есть данные, что высокий уровень рН способствует иммобилизации не только H_2S , но и, вероятно, тиоспиртов и тиоэфиров [93]. Вместе с тем в щелочной среде резко усиливается эмиссия NH_3 , что обусловлено протеканием реакции:



При рН около 11 практически весь аммонийный азот переходит в газообразную форму – NH_3 .

Если за счёт подкисления или подщелачивания удаётся сместить рН в неблагоприятную для гнилостных МО область, то летучие вещества постепенно удаляются (выветриваются) из КП, а новые не образуются. В результате запах снижается. В практическом птицеводстве для контроля запаха может найти применение как способ подкисления, так и способ подщелачивания [94–96].

Таблица 2 / Table 2

Влияние добавок на запах куриного помёта / The effect of additives on the chicken manure odor

Дезодорирующий агент Deodorizing agent	Результат / Result	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
Активированный уголь, силикагель / Activated carbon, silica gel [98]	Запах снижается, но полного устранения или улучшения гедонического тона запаха достигнуть не удаётся, в основном из-за интенсивной эмиссии NH ₃ / The odor is reduced, but complete elimination or improvement of the hedonic odor tone cannot be achieved, mainly due to the intense NH ₃ emission	Безопасность Safety	Высокая стоимость реагентов High cost of reagents
1) Суперфосфат Superphosphat 2) Суперфосфат + MgSO ₄ Superphosphate + MgSO ₄ 3) Суперфосфат + биоуголь + MgSO ₄ / Superphosphate + biochar + MgSO ₄ [99]	1) Снижение эмиссии серосодержащих ЗОВ Reduction of sulphur-containing OFS emission 2) Снижение эмиссии NH ₃ и серосодержащих ЗОВ Reduction of emission of NH ₃ and sulphur-containing OFS 3) Существенное подавление запаха за счёт связывания NH ₃ и серосодержащих ЗОВ Significant odor suppression due to binding of NH ₃ and sulphur-containing OFS	Обогащение КП фосфором Enrichment of CM with phosphorus	Высокая стоимость реагентов / High cost of reagents
Биоуголь / Biochar [100]	Снижение эмиссии серосодержащих ЗОВ Reduction of emissions of sulphur-containing OFS	Безопасность Safety	Недостаточная эффективность Insufficient efficiency
Биоуголь / Biochar [101]	Снижение эмиссии широкого спектра ЛОС / Reduction of a wide range of VOCs emissions		
Активированный уголь, силикагель и цеолит Activated carbon, silica gel and zeolite [102]	Снижение эмиссии ЗОВ при сохранении гедонистического тона запаха. Активированный уголь и силикагель более эффективны, чем цеолит Reducing OFS emissions while maintaining the hedonistic odor tone. Activated carbon and silica gel are more effective than zeolite	Безопасность Safety	Высокая стоимость реагентов. Низкая эффективность High cost of reagents. Low efficiency
Биоуголь и биоуголь в сочетании с MgO / Biochar and biochar combined with MgO [103]	Снижение эмиссии NH ₃ и ЛОС в компосте из КП / Reduction of NH ₃ and VOCs emissions in CM compost		Невысокая эффективность Low efficiency
Клиноптилит / Clinoptilite [104]	Увеличение эмиссии NH ₃ , запах не устраняется / Increased NH ₃ emissions, odor persist		Отсутствие эффекта / Low efficiency
Глауконит / Glaucosite [105]	Полное удаление запаха при добавлении в КП 2% глауконита Complete removal of odor by adding 2% glaucosite to the CM	Обогащение КП калием Enrichment of CM with potassium	Эффект не подтверждён результатами других исследований The effect has not been confirmed by the results of other studies

Дезодорирующий агент Deodorizing agent	Результат / Result	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
CaO (1% от содержания влаги в КП до рН 6,5–6,8) + глауконит (10% от массы КП) / CaO (1% of the moisture content in the CM up to рН 6.5–6.8) + glauconite (10% of the CM mass) [106]	Снижение запаха Odor reduction	Обогащение КП калием и кальцием Enrichment of CM with potassium and calcium	Потеря аммонийного азота, необходимость связывать выделяющийся NH ₃ / Loss of ammonium nitrogen, the need to bind released NH ₃
Гашёная известь + глауконит / Slaked lime + glauconite [107]	Устранение резкого запаха Elimination of pungent odor		
Добавка компоста из КП в норме 30–50% от массы сухого вещества в смеси / Addition of CM compost at a rate of 30–50% of the dry matter weight in the mixture [108]	Снижение запаха Odor reduction	Безопасность Safety	Необходимость приготовления компоста / The need for compost preparation
Цеолит / Zeolite [109]	Неприятный запах не исчезал и даже усиливался / The unpleasant odor did not disappear and even intensified	Безопасность Safety	Низкая эффективность, высокий расход Low efficiency, high consumption
Цеолит (нанесение на поверхность КП) / Zeolite (applied to the CM surface) [110]	Снижение неприятного запаха Reducing unpleasant odor		

Примечание: КП – куриный помёт, ЗОВ – запахообразующие вещества, ЛОС – летучие органические соединения.
Note: CM – chicken manure, OFS – odor-forming substances, VOCs – volatile organic compounds.

Снижению активности гнилостной микробиоты способствует и высушивание КП. Согласно опубликованным данным, НЗ высушенного КП снижается до 65,3–69,3% [97]. К преимуществам метода можно отнести снижение массы высушенного КП и расходов на его транспортировку, улучшение микробиологических характеристик, уменьшение потерь азота, увеличение сроков хранения. К недостаткам – высокое энергопотребление и интенсивная эмиссия ЗОВ в процессе высушивания.

В таблице 2 приведены данные о влиянии различных добавок (реагентов, сорбентов) на запах КП.

Большинство рассмотренных в таблице 2 добавок отличаются доступностью и экологической безопасностью, однако их использование не приводит к полному устранению НЗ, кроме того, применение сорбентов (цеолита, глауконита, угля, силикагеля и др.) увеличивает нагрузку КП балластными компонентами. Существенную опасность для ОС представляет технология обработки КП известью, поскольку под действием соответствующего реагента происходит резкое повышение эмиссии NH₃. Для

снижения негативных экологических последствий данный метод необходимо дополнять технологиями поглощения (связывания) NH₃ в нелетучие формы.

Заключение

Анализ опубликованных источников показывает, что проблема устранения запаха КП привлекает большое внимание исследователей, однако эффективные дезодорирующие добавки, позволяющие полностью устранить НЗ, не нанося вреда ОС, до настоящего времени не найдены. Сложность решаемой задачи обусловлена многокомпонентным и весьма переменным составом помёта, а также высоким содержанием биогенных органических веществ, являющихся хорошей питательной средой для развития МО.

Устранению НЗ способствует компостирование (в том числе с применением ЭМ-технологий), в процессе которого происходит естественная микробиологическая деструкция органических составляющих, однако данный способ является слишком длительным для условий промышленных предприятий, требует

специально оборудованных мест для складирования и созревания компоста, приводит к значительным потерям ценных компонентов КП (прежде всего азота) и выделению парниковых газов.

Более технологичными являются химические методы дезодорации, а также методы иммобилизации ЗОВ на твёрдых сорбентах. Согласно опубликованным данным, к значительному снижению запаха КП приводит сочетанное воздействие негашёной или гашёной извести (химические реагенты) и глауконита (сорбент) с последующим высушиванием смеси. Для глауконита характерно повышенное содержание калия (до 6%) и благоприятные экологические характеристики. Обогащение КП соответствующим материалом позволяет получить органоминеральное удобрение с более сбалансированным содержанием основных элементов минерального питания растений, чем исходный помёт. К недостаткам соответствующего метода следует отнести значительные потери азота (в форме NH_3) при разложении солей аммония в щелочной среде. Для предотвращения эмиссии NH_3 в атмосферу можно использовать технологию поглощения соответствующего газа раствором кислоты (например, серной). Образующийся при этом сульфат аммония может найти применение в качестве азотного удобрения.

References

1. RD-APK 1.10.15.02-17 Methodological recommendations for the technological design of manure and manure removal and preparation systems. Moskva: Rosinformagrotekh, 2017. 172 p. (in Russian).
2. Schetinina S., Kirkorova L. Obtaining environmentally friendly fertilizer by granulating poultry litter // Science, business, power – triad regional development: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg: GNI "Natsrazvitie", 2019. P. 189–193 (in Russian).
3. Baskin-Graves L., Mullen H., Aber A., Sinisterra J., Ayub K., Amaya-Fuentes R., Wilson S. Rapid health impact assessment of a proposed poultry processing plant in Millsboro, Delaware // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. No. 18. Article No. 3429. doi: 10.3390/ijerph16183429
4. Javed A., Imran M., Saad Hashmi M., Javaid U., Estella Odoh U., Amjad R. Chicken egg: a comprehensive overview regarding feed sources and human health aspects // World's Poult. Sci. J. 2025. V. 81. No. 1. P. 1–36. doi: 10.1080/00439339.2024.2439474
5. Niu J., Qiao Y., Yang X., Chen X., Li H., Guo Y., Zhang W., Wang Z. Protease and *Bacillus coagulans* supplementation in a low-protein diet improves broiler growth, promotes amino acid transport gene activity, strengthens intestinal barriers, and alters the cecal microbial composition // Animals. 2025. V. 15. No. 2. Article No. 170. doi:10.3390/ani15020170
6. Abdullah-Al-Amin M., Rahman M.S., Howlider M.A.R., Ahmmed M.M. Disposal of layer droppings reared in case and impact on environmental pollution // J. Bangladesh Agric. Univ. 2009. V. 7. No. 2. P. 281–290. doi: 10.3329/jbau.v7i2.4735
7. Sarker B.C., Alam M.A., Rahman M.M., Tarqul Islam A.F.M., Chowdhury M.G.F. Waste management of commercial poultry farms in Bangladesh // J. Innov. Dev. Strategy. 2009. V. 2. No. 3. P. 34–37.
8. Gobind Singh, Shamsuddin M.R., Aqsha, Lim S.W. Characterization of chicken manure from Manjung region // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 458. Article No. 012084. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012084
9. Ivanov D.G. Method of energy processing of manure // Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva. 2010. No. 82. P. 135–141 (in Russian).
10. Pagliari P.H., Laboski C.A.M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure // J. Environ. Qual. 2012. V. 41. No. 3. P. 901–910. doi: 10.2134/jeq2011.0451
11. Turner B.L., Leytem A.B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: chemical speciation and a novel fractionation procedure // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. No. 22. P. 6101–6108. doi: 10.1021/es0493042
12. Fuentes B., Bolan N., Naidu R., de la Luz Mora M. Phosphorus in organic waste-soil systems // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2006. V. 6. No. 2. P. 64–83. doi: 10.4067/S0718-27912006000200006
13. Mazur T., Wojtaś A. Content of microelements in poultry droppings // Roczniki Gleboznawcze. 1984. V. 35. No. 2. P. 28–34 (in Polish).
14. Khazan M.A., Meskhi B.Ch., Pavlov A.V. Ecological necessity and economic feasibility of processing chicken manure // Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences. 2005. No. S9. P. 76–79 (in Russian).
15. Ravindran B., Mupambwa H.A., Silwana S., Mkeni P.N.S. Assessment of nutrient quality, heavy metals and phytotoxic properties of chicken manure on selected commercial vegetable crops // Heliyon. 2017. V. 3. No. 12. Article No. e00493. doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00493
16. Shang Y., Kumar S., Oakley B., Kim W.K. Chicken gut microbiota: importance and detection technology // Front. Vet. Sci. 2018. V. 5. Article No. 254. doi: 10.3389/fvets.2018.00254
17. Oakley B.B., Lillehoj H.S., Kogut M.H., Kim W.K., Maurer J.J., Pedroso A., Lee M.D., Collett S.R., Johnson T.J., Cox N.A. The chicken gastrointestinal microbiome // FEMS Microbiol. Lett. 2014. V. 360. No. 2. P. 100–112. doi: 10.1111/1574-6968.12608

18. Borda-Molina D., Seifert J., Camarinha-Silva A. Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome // *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 2018. V. 16. P. 131–139. doi: 10.1016/j.csbj.2018.03.002
19. Wei S., Morrison M., Yu Z. Bacterial census of poultry intestinal microbiome // *Poult. Sci.* 2013. V. 92. No. 3. P. 671–683. doi: 10.3382/ps.2012-02822
20. Iqbal Y., Cottrell J.J., Suleria H.A.R., Dunshea F.R. Gut microbiota-polyphenol interactions in chicken: a review // *Animals.* 2020. V. 10. No. 8. Article No. 1391. doi: 10.3390/ani10081391
21. Rychlik I. Composition and function of chicken gut microbiota // *Animals.* 2020. V. 10. No. 1. Article No. 103 doi: 10.3390/ani10010103
22. Byrd J.A., Caldwell D.Y., Nisbet D.J. The identification of fungi collected from the ceca of commercial poultry // *Poult. Sci.* 2017. V. 96. No. 7. P. 2360–2365. doi: 10.3382/ps/pew486
23. Robinson K., Xiao Y., Johnson T.J., Chen B., Yang Q., Lyu W., Wang J., Fansler N., Becker S., Liu J., Yang H., Zhang G. Chicken intestinal mycobiome: initial characterization and its response to bacitracin methylene disalicylate // *Appl. Environ. Microbiol.* 2020. V. 86. No. 13. Article No. e00304-20. doi: 10.1128/AEM.00304-20
24. Robinson K., Yang Q., Stewart S., Whitmore M.A., Zhang G. Biogeography, succession, and origin of the chicken intestinal mycobiome // *Microbiome.* 2022. V. 10. No. 1. Article No. 55. doi: 10.1186/s40168-022-01252-9
25. Gabriel I., Lessire M., Mallet S., Guillot J.F. Microflora of the digestive tract: critical factors and consequences for poultry // *World's Poult. Sci. J.* 2006. V. 62. No. 3. P. 499–511. doi: 10.1017/S0043933906001115
26. Apajalahti J., Vienola K. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion // *Anim. Feed Sci. Tech.* 2016. V. 221. P. 323–330. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.05.004
27. Mozurienne E., Mockus E., Klupsaite D., Starkute V., Tolpeznikaite E., Gruzauskas V., Gruzauskas R., Paulauskaite-Taraseviciene A., Raudonis V., Bartkiene E. Physical and chemical characteristics of droppings as sensitive markers of chicken health status // *Animals.* 2024. V. 14. No. 9. Article No. 1389. doi: 10.3390/ani14091389
28. Deng W., Zhang A., Chen S., He X., Jin L., Yu X., Yang S., Li B., Fan L., Ji L., Pan X., Zou L. Heavy metals, antibiotics and nutrients affect the bacterial community and resistance genes in chicken manure composting and fertilized soil // *J. Environ. Manage.* 2020. V. 257. Article No. 109980. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109980
29. Chen X., Liu R., Hao J., Li D., Wei Z., Teng R., Sun B. Protein and carbohydrate drive microbial responses in diverse ways during different animal manures composting // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 271. P. 482–486. doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.096
30. Guryanov D.V., Khmyrov V.D., Makarov V.A., Papikhin R.V., Maslova M.V. Analysis of mushroom microbiota in chicken litter to cut the time of preparing organic fertilizers in bunkers with the disinfectant aerator of the nest manure // *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev.* 2018. No. 1 (37). P. 74–79 (in Russian).
31. Zhang D., Sun J., Wang D., Peng S., Wang Y., Lin X., Yang X., Hua Q., Wu P. Comparison of bacterial and fungal communities structure and dynamics during chicken manure and pig manure composting // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. V. 30. P. 94347–94360. doi: 10.1007/s11356-023-29056-w
32. Jiang Y., Yao Y., Liu H., Zhang S., Bai X., Ma X., Wang Y., Ren Q. Volatile organic compounds conversion pathways and odor gas emission characteristics in chicken manure composting process // *Front. Ecol. Evol.* 2023. V. 11. Article No. 1192132. doi: 10.3389/fevo.2023.1192132
33. Lovanh N., Cook K.L., Rothrock M.J., Miles D.M., Sistani K. Spatial shifts in microbial population structure within poultry litter associated with physicochemical properties // *Poult. Sci.* 2007. V. 86. No. 9. P. 1840–1849. doi: 10.1093/ps/86.9.1840
34. Kyakuwaire M., Olupot G., Amoding A., Nkedi-Kizza P., Ateenyi Basamba T. How safe is chicken litter for land application as an organic fertilizer?: A review // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V. 16. No. 19. Article No. 3521. doi: 10.3390/ijerph16193521
35. Tan H.Q., Li M., Jie D.F., Zhou Y.F., Li X.A. Effects of different litters on ammonia emissions from chicken manure // *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2019. V. 12. No. 4. P. 27–33. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.5011
36. Naseem S., King A.J. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment – techniques for its reduction during poultry production // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25. No. 16. P. 15269–15293. doi: 10.1007/s11356-018-2018-y
37. Pohl H.R., Citra M., Abadin H.A., Szadkowska-Stańczyk I., Kozajda A., Ingerman L., Nguyen A., Murray H.E. Modeling emissions from CAFO poultry farms in Poland and evaluating potential risk to surrounding populations // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2017. V. 84. P. 18–25. doi: 10.1016/j.yrtph.2016.11.005
38. Bist R.B., Subedi S., Chai L., Yang X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 328. Article No. 116919. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116919
39. Konkol D., Popiela E., Skrzypczak D., Izydoreczyk G., Mikula K., Moustakas K., Opaliński S., Korczyński M., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Recent innovations in various methods of harmful gases conversion and its mechanism in poultry farms // *Environ. Res.* 2022. No. 214. Pt. 2. Article No. 113825. doi: 10.1016/j.envres.2022.113825
40. Swelum A.A., El-Saadony M.T., Abd El-Hack M.E., Abo Ghanima M.M., Shukry M., Alhotan R.A., Hussein E.O.S., Suliman G.M., Ba-Awadh H., Ammari A.A., Taha A.E., El-Tarabily K.A. Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strate-

- gy // Sci. Total Environ. 2021. V. 781. Article No. 146978. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146978
41. Mowrer J., Cabrera M., Rasmussen T., Cassity-Duffey K. Nitrogen in stored poultry litter: Uric acid and xanthine // J. Environ. Qual. 2014. V. 43. No. 6. P. 2137–2145. doi: 10.2134/jeq2014.05.0240
42. Kim W.K., Patterson P.H. Effect of minerals on activity of microbial uricase to reduce ammonia volatilization in poultry manure // Poult. Sci. 2003. V. 82. No. 2. P. 223–231. doi: 10.1093/ps/82.2.223
43. Singh A., Casey K.D., King W.D., Pescatore A.J., Gates R.S., Ford M.J. Efficacy of urease inhibitor to reduce ammonia emission from poultry houses // J. Appl. Poult. Res. 2009. V. 18. No. 1. P. 34–42. doi: 10.3382/japr.2008-00046
44. Thillainayagi S., Harikrishnan S., Jayalakshmi S. Screening, optimization and production of uricase from *Alcaligenes faecalis* isolated from poultry farm litter // Int. J. Sci. Res. Growth. 2021. V. 9. No. 4. P. 69–74.
45. Nanda P., Jagadeesh Babu P.E. Isolation, screening and production studies of uricase producing bacteria from poultry sources // Prep. Biochem. Biotechnol. 2014. V. 44. No. 8. P. 811–821. doi: 10.1080/10826068.2013.867875
46. Krajewska B., Ureasas I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review // J. Mol. Catal. B: Enzym. 2009. V. 59. No. 1–3. P. 9–21. doi: 10.1016/j.molcatb.2009.01.003
47. Qin Y., Cabral J.M.S. Properties and applications of urease // Biocatal. Biotransformation. 2002. V. 20. No. 1. P. 1–14. doi: 10.1080/10242420210154
48. Wang H., Miao L., Sun X., Wu L., Fan G. Experimental study of enzyme-induced carbonate precipitation for high temperature applications by controlling enzyme activity // Geomicrobiol. J. 2022. V. 39. No. 6. P. 502–514. doi: 10.1080/01490451.2022.2045649
49. Li R., Zheng M., Zheng M., Cai R., Cui X., Wang Y., Jiang X., Xu C. Metagenomic analysis reveals the linkages between bacteria and the functional enzymes responsible for potential ammonia and biogenic amine production in alfalfa silage // J. Appl. Microbiol. 2022. V. 132. No. 4. P. 2594–2604. doi: 10.1111/jam.15411
50. Wójcik W., Łukasiewicz M., Puppel K. Biogenic amines: formation, action and toxicity – a review // J. Sci. Food Agric. 2021. V. 101. No. 7. P. 2634–2640. doi: 10.1002/jsfa.10928
51. Buňková L., Buňka F., Klčovská P., Mrkvička V., Doležalová M., Kráčmar S. Formation of biogenic amines by Gram-negative bacteria isolated from poultry skin // Food Chem. 2010. V. 121. No. 1. P. 203–206. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.12.012
52. Zhang Y., Liang Z., Tang C., Liao W., Yu Y., Li G., Yang Y., An T. Malodorous gases production from food wastes decomposition by indigenous microorganisms // Sci. Total Environ. 2020. V. 717. Article No. 137175. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137175
53. Chen M., Cao Z., Jing B., Chen W., Wen X., Han M., Wang Y., Liao X., Wu Y., Chen T. The production of methyl mercaptan is the main odor source of chicken manure treated with a vertical aerobic fermenter // Environ. Res. 2024. V. 260. Article No. 119634. doi: 10.1016/j.envres.2024.119634
54. Clanton C.J., Schmidt D.R. Sulfur compounds in gases emitted from stored manure // Trans. ASAE. 2000. V. 43. No. 5. P. 1229–1239. doi: 10.13031/2013.3016
55. Wang Y., Huang M., Meng Q., Wang Y. Effects of atmospheric hydrogen sulfide concentration on growth and meat quality in broiler chickens // Poult. Sci. 2011. V. 90. No. 11. P. 2409–2414. doi: 10.3382/ps.2011-01387
56. Cai S., Ma Y., Bao Z., Yang Z., Niu X., Meng Q., Qin D., Wang Y., Wan J., Guo X. The impacts of the C/N ratio on hydrogen sulfide emission and microbial community characteristics during chicken manure composting with wheat straw // Agriculture. 2024. V. 14. No. 6. Article No. 948. doi: 10.3390/agriculture14060948
57. Sun B., Hou L., Yang Y. Effects of adding eubiotic lignocellulose on the performance, the gut microbiota, and short-chain fatty acids of layer chickens // Braz. J. Microbiol. 2022. V. 53. No. 4. P. 2205–2213. doi: 10.1007/s42770-022-00796-0
58. Sun B., Hou L., Yang Y. Effects of adding eubiotic lignocellulose on the growth performance, laying performance, gut microbiota, and short-chain fatty acids of two breeds of hens // Front. Vet. Sci. 2021. V. 8. Article No. 668003. doi: 10.3389/fvets.2021.668003
59. Zhou G., Huang X., Zhang S., Xiang Z., Wei J., Ma S., Teng S., Zheng Z. Volatile fatty acids (VFAs) production from sludge and chicken manure anaerobic co-fermentation: Effects of mixing ratio and microbial mechanisms // J. Environ. Chem. Eng. 2024. V. 12. No. 5. Article No. 114014. doi: 10.1016/j.jece.2024.114014
60. Li M.X., He X.S., Tang J., Li X., Zhao R., Tao Y.Q., Wang C., Qiu Z.P. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting // Chemosphere. 2021. V. 264. Pt. 2. Article No. 128549. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128549
61. Ma Q., Li Y., Xue J., Cheng D., Li Z. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw // Molecules. 2022. V. 27. No. 2. Article No. 472. doi: 10.3390/molecules27020472
62. Yang G.Q., Yin Y., Liu H.Y., Liu G.H. Effects of dietary oligosaccharide supplementation on growth performance, concentrations of the major odor-causing compounds in excreta, and the cecal microflora of broilers // Poult. Sci. 2016. V. 95. No. 10. P. 2342–2351. doi: 10.3382/ps/pew124
63. Borowski S., Matusiak K., Powalowski S., Pielech-Przybylska K., Makowski K., Nowak A., Rosowski M., Komorowski P., Gutarowska B. A novel microbial-mineral preparation for the removal of offensive odors from poultry manure // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2017. V. 119. P. 299–308. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.10.042
64. Zhao H., Li S., Pu J., Wang H., Dou X. Effects of Bacillus-based inoculum on odor emissions co-regulation,

- nutrient element transformations and microbial community topological structures during chicken manure and sawdust composting // *J. Environ. Manage.* 2024. V. 354. Article No. 120328. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120328
65. Hidayat M.Y., Saud H.M., Samsudin A.A. Reduction of hydrogen sulphide in chicken manure by immobilized sulphur oxidising bacteria isolated from hot spring // *Microbiol. Biotechnol. Lett.* 2019. V. 47. No. 1. P. 116–124. doi: 10.4014/mbl.1801.01005
66. Borowski S., Gutarowska B. Odor removal from the environment through the action of microorganisms // *Proceeding of the International Symposium “New Research in Biotechnology”*. Bucharest, Romania, 2008. doi: 10.13140/2.1.3560.5765
67. Lu D., Mi J., Wu Y., Liang J., Liao X., Wang Y. Effects of different laying hen species on odour emissions // *Animals*. 2020. V. 10. No. 11. Article No. 2172. doi: 10.3390/ani10112172
68. Ranadheera C.S., McConchie R., Phan-Thien K., Bell T. Strategies for eliminating chicken manure odour in horticultural applications // *World’s Poult. Sci. J.* 2017. V. 73. No. 2. P. 365–378. doi: 10.1017/S0043933917000083
69. Turan N.G., Akdemir A., Ergun O.N. Emission of volatile organic compounds during composting of poultry litter // *Water Air Soil Pollut.* 2007. V. 184. P. 177–182. doi: 10.1007/s11270-007-9406-0
70. Fakkaew K., Kongkratoke S., Tantrakarnapa K., Polprasert C., Sudsandee S. Characteristics of gases emitted from chicken manure wastewater and potential effects on human health // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. No. 42. P. 63227–63232. doi: 10.1007/s11356-022-20357-0
71. Glindemann D., Edwards M., Liu J.A., Kuschik P. Phosphine in soils, sludges, biogases and atmospheric implications – a review // *Ecol. Eng.* 2005. V. 24. No. 5. P. 457–463. doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.01.002
72. Yoshio Y., Nagata E. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method // *Odor measurement review*. Kawasaki City: Ministry of the Environment, Government of Japan, 2003. P. 118–127.
73. Suzuki N., Nakaoka H., Eguchi A., Hanazato M., Nakayama Y., Tsumura K., Takaguchi K., Takaya K., Todaka E., Mori C. Concentrations of formic acid, acetic acid, and ammonia in newly constructed houses // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. V. 17. No. 6. Article No. 1940. doi: 10.3390/ijerph17061940
74. Xiao Z., Lu J.R. Generation of acetoin and its derivatives in foods // *J. Agric. Food Chem.* 2014. V. 62. No. 28. P. 6487–6497. doi: 10.1021/jf5013902
75. Sharma N.K., Choct M., Wu S., Swick R.A. Nutritional effects on odour emissions in broiler production // *World’s Poult. Sci. J.* 2017. V. 73. No. 2. P. 257–280. doi: 10.1017/S0043933917000046
76. Enticknap J.J., Nonogaki H., Place A.R., Hill R.T. Microbial diversity associated with odor modification for production of fertilizers from chicken litter // *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. V. 72. No. 6. P. 4105–4114. doi: 10.1128/AEM.02694-05
77. Qiu Z., Li M., Song L., Wang C., Yang S., Yan Z., Wang Y. Study on nitrogen-retaining microbial agent to reduce nitrogen loss during chicken manure composting and nitrogen transformation mechanism // *J. Cleaner Prod.* 2021. V. 285. Article No. 124813. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124813
78. Zhao K., Jia X., Lin J., Zhao J., Lin C., Chen J. Comparing the promoting effect of constructed bacterial agents and mature compost on chicken manure composting // *Waste Biomass Valor.* 2024. V. 15. No. 2. P. 727–741. doi: 10.1007/s12649-023-02179-4
79. DeLaune P.B., Moore P.A. Jr., Daniel T.C., Lemunyon J.L. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter // *J. Environ. Qual.* 2004. V. 33. No. 2. P. 728–734. doi: 10.2134/jeq2004.7280
80. McCrory D.F., Hobbs P.J. Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes: a review // *J. Environ. Qual.* 2001. V. 30. No. 2. P. 345–355. doi: 10.2134/jeq2001.302345x
81. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 6–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019
82. Nahm K.H. Environmental effects of chemical additives used in poultry litter and swine manure // *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.* 2005. V. 35. No. 5. P. 487–513. doi: 10.1080/10643380590966208
83. Tasistro A.S., Kissel D.E. Composition of aqueous extracts of broiler litter treated with aluminum sulfate, ferrous sulfate, ferric chloride and gypsum // *J. Environ. Sci. Health B*. 2006. V. 41. No. 6. P. 989–1000. doi: 10.1080/03601230600808620
84. Kolevatykh E.P., Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Ashikhmina T.Ya. Transformation of the microbiota of animal husbandry waste under the influence of chemical reagents to eliminate odor // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165
85. Syrchina N.V., Philip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Kuznetsov D.A. Effect of sodium hypochlorite on the microbiota and odor of manure effluents // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2023. No. 1. P. 107–116 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116
86. Ritz C.W., Fairchild B.D., Lacy M.P. Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: A review // *J. Appl. Poult. Res.* 2004. V. 13. No. 4. P. 684–692. doi: 10.1093/japr/13.4.684
87. Jensen A.Ø. Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid // *Transactions of the ASAE*. 2022. V. 45. No. 1. P. 223–227. doi: 10.13031/2013.7874
88. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying

- manure effluent on its microbiological characteristics // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 161–167 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
89. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N. Rational utilization of sulfuric acid waste generated during chlorine production // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-143-148
90. Abustan, Pudjirahaju A., Arsyad M. Reducing ammonia gas from chicken manure with lime and soybean plants // Environ. Qual. Manage. 2019. V. 28. No. 4. P. 49–56. doi: 10.1002/tqem.21635
91. Maguire R.O., Hesterberg D., Gernat A., Anderson K., Wineland M., Grimes J. Liming poultry manures to decrease soluble phosphorus and suppress the bacteria population // J. Environ. Qual. 2006. V. 35. No. 3. P. 849–857. doi: 10.2134/jeq2005.0339
92. Fangueiro D., Hjorth M., Gioelli F. Acidification of animal slurry – a review // J. Environ. Manage. 2015. V. 149. P. 46–56. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.001
93. Arifin B., Bono A., Janaun J. The transformation of chicken manure into mineralized organic fertilizer // J. Sustainable Sci. Manage. 2006. V. 1. P. 58–63.
94. Rothrock M.J. Jr., Cook K.L., Warren J.G., Eiteman M.A., Sistani K. Microbial mineralization of organic nitrogen forms in poultry litters // J. Environ. Qual. 2010. V. 39. No. 5. P. 1848–1857. doi: 10.2134/jeq2010.0024
95. Loch F.C., de Oliveira M.C., da Silva D., Gonçalves B.N., de Faria B.F., Menezes J.F.S. Quality of poultry litter submitted to different treatments in five consecutive flocks // R. Bras. Zootec. 2011. V. 40. No. 5. P. 1025–1030. doi: 10.1590/S1516-35982011000500013
96. Gonçalves N.S., Komiyama C.M., da Rosa C.C.B., de Lima J.F.P., de Moraes M.D.G., Savegnago F.B., Mezzalira Júnior C., Staub L. Quality of chicken litter and the alternative of acidification as treatment // Nativa. 2019. V. 7. No. 6. P. 828–834 (in Portuguese). doi: 10.31413/nativa.v7i6.7041
97. Ghaly A.E., Alhattab M. Drying poultry manure for pollution potential reduction and production of organic fertilizer // American Journal of Environmental Sciences. 2013. V. 9. No. 2. P. 88–102. doi: 10.3844/ajessp.2013.88.102
98. Maruthai Pillai S. Intercomparison of headspace sampling methods coupled to TD-GC-MS/O to characterize key odorants from broiler chicken litter: PhD thesis. Sydney: UNSW, 2011. 294 p. doi: 10.26190/unsworks/14999
99. Liu Y., Ma R., Tang R., Zheng G., Li G., Yin J., Yuan J. Phosphate, magnesium containing additives and biochar regulate compost maturity and synergistically reduce odor emission in chicken manure composting: Role of physicochemical, bacterial and fungal dynamics // J. Environ. Manage. 2024. V. 371. Article No. 123205. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123205
100. Sharadqah S.I., Al-Dwairi R.A. Control of odorants emissions from poultry manure using Jordanian natural zeolites // Jordan Journal of Civil Engineering. 2010. No. 4 (4). P. 378–388.
101. Sánchez-Monedero M.A., Sánchez-García M., Alburquerque J.A., Cayuela M.L. Biochar reduces volatile organic compounds generated during chicken manure composting // Bioresour. Technol. 2019. V. 288. Article No. 121584. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121584
102. Pillai S.M., Parsi G., Wang X., Stuetz R.M. Odour abatement of poultry litter using odour control products // Chemical Engineering Transactions. 2012. No. 30. P. 247–252. doi: 10.3303/CET1230042
103. Pang Y., Zhen F., Wang D., Luo Z., Huang J., Zhang Y. Effects of biochar combined with MgO desulfurization waste residue on nitrogen conversion and odor emission in chicken manure composting // Environ. Technol. 2024. V. 45. No. 23. P. 4779–4790. doi: 10.1080/09593330.2023.2283086
104. Amon M., Dobeic M., Sneath R.W., Phillips V.R., Misselbrook T.H., Pain B.F. A farm-scale study on the use of clinoptilolite zeolite and De-Odorase® for reducing odour and ammonia emissions from broiler houses // Bioresour. Technol. 1997. V. 61. No. 3. P. 229–237. doi: 10.1016/S0960-8524(97)00005-9
105. Khopyak N., Manenko A., Tkachenko H., Khopyak K. Using of glauconite for neutralization of fresh poultry manure // The Commonwealth of Sciences. Baranovichi-2017: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh issledovateley. Baranovichi: BarSU, 2017. Pt. 3. P. 224–226.
106. Filchenkov O.A., Slyusarenko V.V., Rusinov A.V., Sakseev R.V., Skosyrev K.V. Method for utilization and disinfection of chicken manure // Patent RU 2645901 C1. Application: 2017114614, 27.04.2017. Date of publication: 28.02.2018. Bull. 7 (in Russian).
107. Khazgaliev N.V. Method of processing poultry droppings // Patent RU 2647918 C1. Application: 2017122108, 22.06.2017. Date of publication: 21.03.2018. Bull. 9 (in Russian).
108. Khajrullin R.M. Method of producing fertilizer from chicken manure // Patent RU 2731291 C1. Application: RU2019117588A, 06.06.2019. Date of publication: 01.09.2020. Bull. 25 (in Russian).
109. Donnell C., Parker D.B., Matlack R.S., Caraway E.A., Rhoades M.B., Spears J. Zeolite amendment to minimize ammonia, hydrogen sulfide, and VOC emissions // ASABE Annual International Meeting. Providence, Rhode Island: ASABE, 2008. Article No. 084133. doi: 10.13031/2013.24963
110. Cai L., Koziel J.A., Liang Y., Nguyen A.T., Xin H. Evaluation of zeolite for control of odorants emissions from simulated poultry manure storage // J. Environ. Qual. 2007. V. 36. No. 1. P. 184–193. doi: 10.2134/jeq2006.0052

Использование многомерного анализа для оценки аллелопатической активности *Quercus robur* L., *Acer plantanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. в естественных и искусственных фитоценозах Южного Урала

© 2025. И. А. Гетманец, д. б. н., зав. кафедрой,
Д. Ю. Нохрин, к. б. н., доцент,
П. В. Левченко, ст. преподаватель,
Челябинский государственный университет,
454001, Россия, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, д. 129,
e-mail: igetmanec@mail.ru

Изучена аллелопатическая активность *Quercus robur*, *Acer plantanoides*, *Ulmus glabra* в природных реликтовых сообществах и лесных насаждениях Южного Урала, а также вклад факторов: агенты переноса – вытяжки из листьев, листового опада, корневых выделений; тип местообитания (естественное/искусственное), концентрация водных вытяжек (1:100, 1:50, 1:25, 1:10); вид растения-донора (*Q. robur*, *A. plantanoides*, *U. glabra*), влияющих на дисперсию показателей аллелопатического воздействия. В ходе классических лабораторных опытов исследованы различные сочетания пар видов в системе донор-акцептор и оценена аллелопатическая активность по ростовым реакциям (всхожесть и длина корня) классических тест-объектов *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L. Время экспозиции составило 120 ч, при освещении с фотопериодом в 15 ч дневного режима и температурой 21 ± 1 °C. Получен массив первичных морфометрических измерений (720 показателей).

Для оценки вклада факторов, определяющих аллелопатическую активность растений-доноров использована многомерная статистическая техника – анализ избыточности (Redundancy analysis). Статистическая значимость эффектов подтверждена в ходе рандомизационной процедуры при $p \leq 0,05$. На основе первичных показателей объяснено влияние каждого фактора в вариацию значений аллелопатической активности. Установлена иерархия регрессоров (факторов) по вкладу в дисперсию показателей аллелопатической активности. Воздействие агентов переноса является статистически значимым ($F_{(2/69)} = 18,91$; $p < 0,001$) и демонстрирует вклад в дисперсию показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов на 35,4%. Регрессор – вид-донор определяет меньшую вариабельность (16,0%) выше приведённых показателей растений-акцепторов при статистической значимости ($F_{(2/69)} = 6,58$; $p < 0,001$). Многомерный анализ подтвердил статистически значимую обратную зависимость между концентрацией водных вытяжек всех видов-доноров и ингибирующим эффектом на прорастание семян биотестов. Минимальный вклад в дисперсию выявлен у регрессора – тип местообитания. В градиенте между естественными и искусственными сообществами вклад в вариацию составляет 1,95% и не является статистически значимым. Таким образом, показана целесообразность использования многомерного статистического анализа для сравнения аллелопатического влияния.

Ключевые слова: биотесты, регрессоры, агенты переноса, анализ избыточности, аллелопатия, доноры, акцепторы, естественные и искусственные сообщества.

Assessment of *Quercus robur* L., *Acer plantanoides* L., and *Ulmus glabra* Huds. allelopathic activity in natural and artificial phytocenoses of the Southern Urals using multivariate analysis

© 2025. I. A. Getmanets ORCID: 0000-0003-0370-2019[†]
D. Y. Nokhrin ORCID: 0000-0002-4920-2338[†]
P. V. Levchenko ORCID: 0000-0002-4467-8038[†]
Chelyabinsk State University,
129, Br. Kashirinykh St., Chelyabinsk, Russia, 454001,
e-mail: igetmanec@mail.ru

The *Quercus robur*, *Acer plantanoides*, *Ulmus glabra* allelopathic activity in natural relict communities and forest plantations of the Southern Urals was studied. We also examined the contribution of factors affecting the variance of allelopathic transfer indicators. Among them are transfer agents (extracts from leaves, leaf fall, root zone soil), habitat

type (natural/artificial), concentration of water extracts (1:100, 1:50, 1:25, 1:10), and type of donor plant species (*Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*). Various combinations of species pairs in the donor–acceptor system were studied in classical laboratory experiments. Allelopathic activity was evaluated by growth responses (germination and root length) of classical test subjects *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L. The exposure time was 120 h, under illumination with a photoperiod of 15 h of daylight and temperature 21 ± 1 °C. An array of primary morphometric measurements (720 indicators) was obtained.

Multivariate statistical technique – Redundancy analysis – was used to evaluate the contribution of factors determining allelopathic activity of donor plants. Statistical significance of the effects was confirmed by randomisation procedure at $p \leq 0.05$. The effect of each factor in the variation of allelopathic activity values is explained based on primary indicators. The hierarchy of regressors (factors) by contribution to the variance of allelopathic activity indicators was established. The impact of transfer agents is statistically significant ($F_{(2/69)} = 18.91; p < 0.001$) and demonstrates a contribution to the variance of germination and root length indices of acceptor plants by 35.4%. Regressor – donor species – determines less variability (16.0%) of the above indicators of acceptor plants at statistical significance ($F_{(2/69)} = 6.58; p < 0.001$). Multivariate analysis confirmed a statistically significant inverse relationship between the concentration of aqueous extracts of all donor species and the inhibitory effect on seed germination of the biotests. The minimum contribution to the variance was found for the regressor, habitat type. In the gradient between natural and artificial communities, the contribution to variance is 1.95% and is not statistically significant. Thus, the feasibility of using multivariate statistical analysis to compare allelopathic effect is shown.

Keywords: biotests, regressors, transfer agents, redundancy analysis, allelopathy, donors, acceptors, natural and artificial communities.

Аллелопатия играет важную роль в жизни лесных экосистем, поскольку является фактором, влияющим на их состав, структуру, функции [1–4]. Поэтому изучение феномена аллелопатии способствует решению практических задач облесения и управления смешанными насаждениями, что обуславливает устойчивое лесопользование [5, 6].

К настоящему времени накоплен достоверный материал об аллелопатических взаимоотношениях растений в лесных экосистемах. Показано, что аллелопатически активные вещества корневых систем, листьев и листового опада могут стимулировать либо угнетать рост и развитие видов-акцепторов [1, 7–9]. Причём, как считают некоторые исследователи, изучение аллелопатических эффектов целесообразно проводить в границах естественных экосистем и в экотонах искусственных фитоценозов [7, 8, 12].

Выявлено, что воздействия аллелохимикатов проявляются на разных уровнях изучения морфологической организации реципиентов, например, на молекулярном уровне – в накоплении в клетке активного кислорода под действием катехина и других фенолов и хинонов [6, 10, 11]. На клеточном и тканевом уровнях продемонстрировано блокирование аллелохимикатами ферментов запасных веществ, влияние на структурную организацию компонентов клетки и её деление [12]. На биоморфологическом уровне показана поливариантность развития систем монокарпического побега и изменение онтогенетической траектории акцептора [13].

Несмотря на разнообразие подходов к изучению аллелопатической активности, веду-

щими остаются классические лабораторные методы (метод биотестов), позволяющие получать массивы первичных морфометрических измерений всхожести семян и длины корня. Последние можно интерпретировать по шкале условных кумариновых единиц [1, 8]. Лабораторные методы позволяют исследовать различные сочетания пар видов в системе донор-акцептор и исключить действие факторов, постоянно действующих на растительный организм в естественной среде [8]. При этом исследователи, как правило, получают большие объёмы числовых данных. В связи с этим возникает объективная необходимость проанализировать их одновременно, оценить вклад каждого фактора в аллелопатический эффект, его статистическую значимость, что можно выполнить с использованием многомерного анализа [14, 15].

Цель настоящей статьи – выявление с использованием многомерного анализа статистической значимости аллелопатических эффектов *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra* в естественных и искусственных фитоценозах Южного Урала в зависимости от вклада каждого типа регрессора.

Объекты и методы исследования

Выбор объектов исследования обусловлен различным ценотическим поведением и аллелопатической активностью и эколого-фитоценологической приуроченностью в однородных в физико-географическом отношении условиях территориального выдела.

Полевые исследования проведены в пределах двух широтных географических

зон: лесной – на территории особо охраняемых природных объектов (Нязепетровский и Ашинский районы) и лесостепной – в искусственных насаждениях г. Челябинска с эдификаторами древесного яруса – *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*.

На пробных площадях 100 м² отобраны листья, пробы листового опада и почвы прикорневой зоны исследуемых доноров в соответствии с методикой [1]. Водные экстракты готовили, смешивая листья, листового опада и почву с дистиллированной водой в соотношении 1:10 по массе, настаивали вытяжки 24 ч в темноте. Такое соотношение характеризуется низкой степенью растворимости, и позволяет продемонстрировать аллелопатические эффекты [11]. Далее полученные экстракты разбавляли дистиллированной водой в соотношениях 1:100, 1:50, 1:25 и 1:10. В лабораторных опытах взяты семена классических тест-объектов *Lepidium sativum* L., *Linum usitatissimum* L., *Viola tricolor* L., чувствительность которых к аллелопатически активным веществам продемонстрирована во многих исследованиях [1, 2, 10]. Семена (по 15 шт. каждого вида) проращивали в 10 мл вытяжки всех четырёх концентраций и контроле

с дистиллированной водой при освещении с фотопериодом в 15 ч дневного режима и температурой 21±1 °С. Опыт закладывали в предварительно простерилизованных чашках Петри в трёхкратной повторности для каждого варианта. Ежедневно определяли всхожесть семян по формуле [(число проросших семян) / (число посеянных семян)] · 100% [1] и длину корней проростков в мм. Общее время экспозиции 120 ч.

Статистическая обработка данных проведена путём анализа избыточности, в котором факторами, влияющими на дисперсию показателей (регрессорами), выступали: тип местообитания (естественное/искусственное); концентрация водных вытяжек (1:100, 1:50, 1:25, 1:10); агенты переноса (листья, листового опада, почва прикорневой зоны); вид растений-доноров (*Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*).

Статистическую значимость зависимости показателей от факторов в **Redundancy analysis (RDA)** проводили в рандомизационном варианте дисперсионного анализа (permutation ANOVA, *n*=9999); значимыми считали эффекты при *p*≤0,05. Расчёты выполнены в пакете *vegan* (version 2.6–4 [16]) для программно-статистической среды R, version 4.3.1 [17].

Таблица 1 / Table 1

Всхожесть семян *Viola tricolor* L. (в %) под воздействием водных вытяжек листьев, листового опада и корневых выделений из естественных и искусственных сообществ
Germination of *Viola tricolor* L. seeds (in %) under the influence of aqueous extracts of leaves, leaf litter and soil in their natural and artificial communities

Регрессоры Regressors	Показатели, % / Indicators, %											
	Растения-доноры / Donor plants											
	Клён / Maple <i>Acer platanoides</i> L.				Вяз / Elm <i>Ulmus glabra</i> Huds.				Дуб / Oak <i>Quercus robur</i> L.			
Естественное местообитание / Natural locality												
Концентрация раствора / Solution concentration	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10
Агенты переноса / Transfer agents												
Листья / Leaves	59,0	48,6	37,2	29,4	62,0	53,5	39,4	29,0	12,0	0,0	0,0	0,0
Опад / Leaf litter	100	88,0	76,4	68,0	80,0	62,2	55,0	43,0	60,4	24,6	0,0	0,0
Корневые выделения Root excretions	86,0	80,0	69,3	50,5	89,0	86,3	80,0	97,6	72,0	67,9	52,8	50,0
Искусственное местообитание / Artificial locality												
Концентрация раствора Solution concentration	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10	1:100	1:50	1:25	1:10
Агенты переноса / Transfer agents												
Листья / Leaves	69,8	46,1	41,8	35,3	55,0	41,9	32,3	27,6	66,0	43,1	20,2	14,3
Опад / Leaf litter	100	92,7	81,4	70,4	98,0	83,4	68,8	58,0	78,2	44,0	10,0	7,5
Корневые выделения Root excretions	83,8	83,1	79,8	69,2	80,0	84,3	88,0	92,7	35,0	31,3	21,9	0,0

Результаты и обсуждение

В качестве примера полученных данных в таблице 1 приведён их фрагмент с информацией по всхожести семян фиалки трёхцветной.

Сложность применения классического дисперсионного анализа обусловлена сочетанием двух обстоятельств. Во-первых, все абиотические факторы в условиях проведенного опыта были контролируемы для выявления именно аллелопатического влияния. Во-вторых, эксперимент проводили в трёхкратной повторности. Эти обстоятельства диктуют необходимость использовать многофакторные модели дисперсионного анализа с фиксированными эффектами и единственным наблюдением на ячейку комплекса: либо четырёхфакторную, которая должна применяться 6 раз (3 растения-акцептора \times 2 показателя: всхожесть и длина главного корня), либо ещё более сложные – вплоть до шестифакторной, с факторами: местообитание (2 градации фактора искусственные и естественные насаждения), растения-доноры (3), концентрация водной вытяжки (4), агенты переноса (3), растения-акцепторы (3) и показатели (2).

Если бы все факторы в модели были случайными, то в качестве ошибки в таком комплексе можно было бы использовать их взаимодействие, которое возможно вычислить, но нельзя оценить статистически. Зато в результате были бы получены значения F -критерия и p -значения для всех главных эффектов и всех взаимодействий. Если бы только часть факторов в модели были случайными, то оценить статистическую значимость большинства эффектов в комплексе всё равно удалось бы на основе декомпозиции сумм квадратов по Сэттервейту [18].

Однако в случае исключительно фиксированных факторов провести статистическую оценку невозможно даже для главных эффектов. Поэтому мы прибегли к технике многомерного анализа – анализу избыточности – которая позволяет, во-первых, проанализировать весь массив данных одновременно, а во-вторых, оценить статистическую значимость эффектов с использованием рандомизационной процедуры Монте-Карло.

Анализ избыточности (RDA) относится к группе ординационных, или проекционных методов, призванных объяснить изменчивость большого числа наблюдаемых признаков меньшим числом рассчитанных на их основе ненаблюдаемых (латентных) переменных [14, 15]. Самым известным методом этой группы

является анализ главных компонент (PCA), который относится экологами к методам непрямого градиентного анализа, поскольку блок средовых факторов не задействуется в анализе напрямую, а главные компоненты, рассчитанные на основе ковариаций или корреляций признаков (численность видов и другие показатели) могут интерпретироваться уже только после анализа – путём поиска связей между компонентами и факторами [19]. В отличие от PCA, RDA является методом прямого градиентного анализа, который асимметрично обрабатывает два блока показателей: блок независимых показателей – регрессоров (факторов) и блок зависящих от них откликов (показателей). Поэтому анализ избыточности объясняет не всю присущую набору признаков изменчивость (количественно – дисперсию), а только ту её часть, которая напрямую определяется регрессорами [6, 19]. В нашем случае такими регрессорами были 4 фактора, представленные в таблице 1, а откликами – всхожесть и длина корня трёх растений-акцепторов, т. е. 6 показателей. Рассмотрим вклад каждого регрессора в порядке уменьшения доли объясняемой им дисперсии.

Агенты переноса. Этот регрессор является самым сильным предиктором (прогностический параметр) варибельности показателей растений-акцепторов: более чем на треть (35,4%) определяет дисперсию их всхожести и длины корня, а само влияние было высоко статистически значимым ($F_{(2/69)} = 18,91; p < 0,001$). Поскольку предикторов было 3 (листья, опад и корневые выделения), в анализе возможно выделение двух осей RDA, но практически всё их влияние (96,3%) объяснялось только первой осью. На рисунке 1 представлен сдвоенный график (биplot) ординационной диаграммы этого влияния, на котором регрессоры представлены векторами, а отклики – значками. Такая диаграмма интерпретируется аналогично методу анализа главных компонент: находящиеся по одну сторону от нуля по данной оси векторы коррелируют между собой положительно, по разные стороны – отрицательно. Точки объектов группируются рядом с теми векторами, которые влияют на них наиболее сильно.

Как видно из рисунка 1, вдоль первой оси проявилось отличие влияния смывов с листьев от воздействия экстракта листового опада и особенно – корневых выделений. Для первых агентов переноса наблюдались наиболее низкие значения длины корней и особенно – всхожести, то есть вытяжки ока-

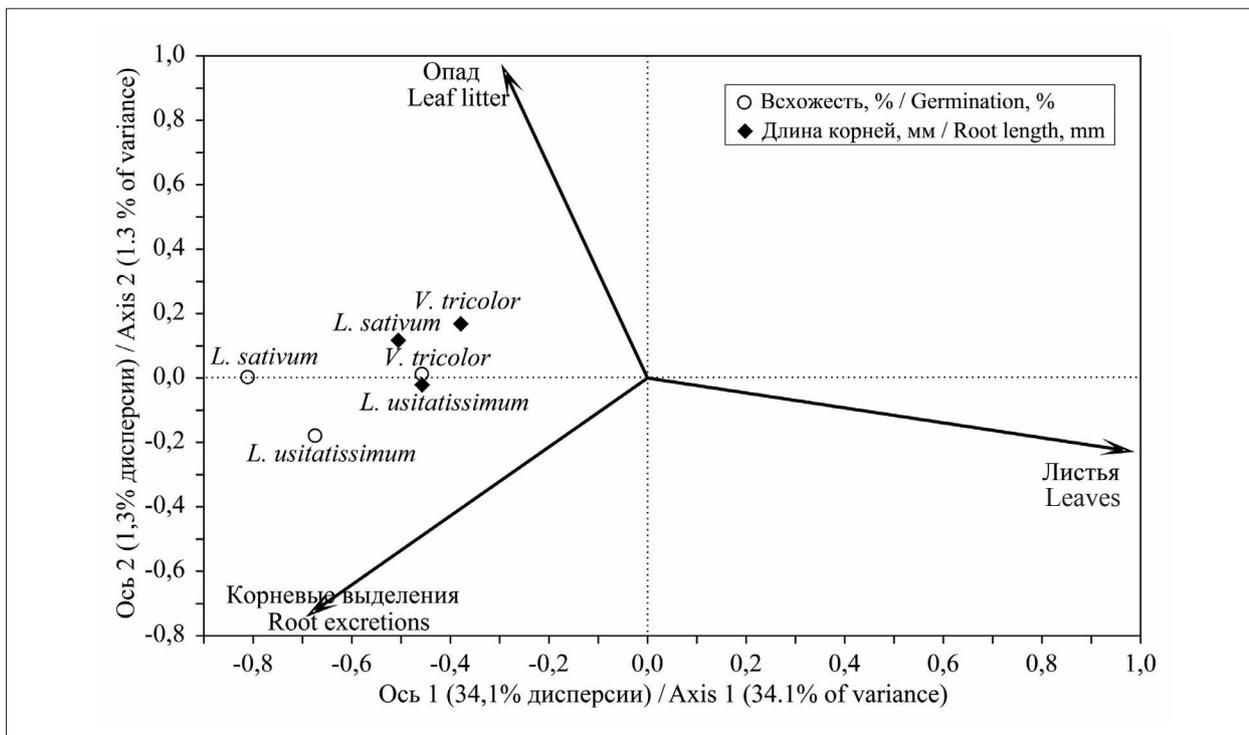


Рис. 1. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве агентов переноса анализа избыточности / Fig. 1. Germination and root length of acceptor plants in the space of transfer agents of redundancy analysis

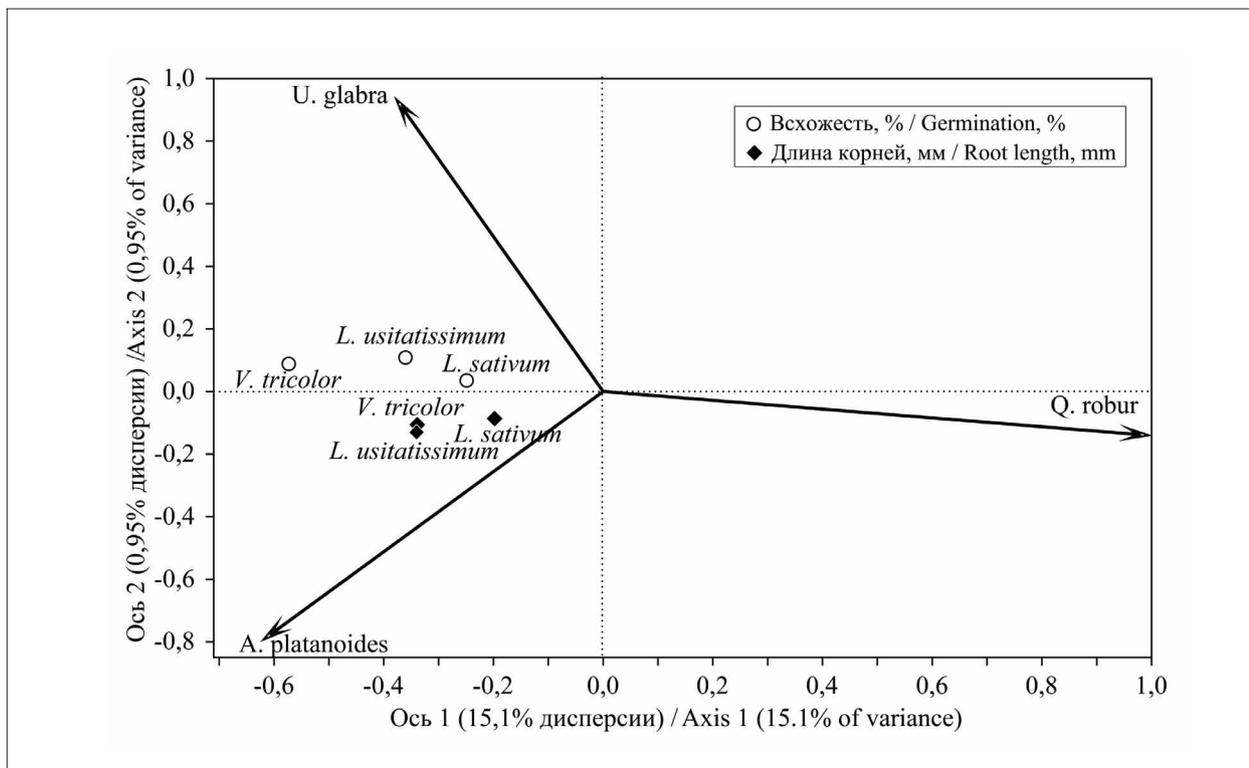


Рис. 2. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве растений-доноров анализа избыточности / Fig. 2. Germination and root length of acceptor plants in the space of donor plants of redundancy analyses

зали максимальный ингибирующий эффект. Водные вытяжки опада и корневых выделений оказали меньшее воздействие на *L. sativum*, *L. usitatissimum*.

Растения-доноры. Несколько меньшее влияние на дисперсию показателей оказал выбор растений-доноров. Вклад данного регрессора в вариабельность составляет 16,0% и является статистически значимым ($F_{(2/69)}=6,58$; $p<0,001$). Как и с воздействием агентов переноса, влияние растений-доноров объясняется первой осью (15,07% из 16,02 или 94,1%), по которой проявилось ингибирующее влияние на показатели вариантов опыта с водными вытяжками из листьев, листового опада и почвы прикорневой зоны дуба, при стимулирующем – вяза и особенно клёна (рис. 2). Несмотря на слабый вклад видов-доноров в дисперсию, как показано на второй оси (0,95%) и ординационной диаграмме, прослеживается тенденция: увеличение всхожести семян растений-акцепторов под влиянием водных вытяжек листьев, листового опада и почвы вяза и увеличение длины корней проростков – под влиянием аналогичных водных вытяжек клёна.

Концентрация растворов. Влияние данного фактора на рассматриваемые показатели было ещё слабее (12,6%), но статистически значимо ($F_{(1/70)}=3,28$; $p=0,026$). Векторы концентраций растворов образовали в пространстве двух первых осей RDA арку с минимальной концентрацией в левом верхнем углу и максимальной – в верхнем правом (рис. 3). Данный эффект хорошо известен в многомерном анализе данных как эффект Гуттмана, а в экологии – как эффект арки или подковы («the horseshoe effect»). Чаще всего он является артефактом, указывающим на тренд в данных. В экологии сообществ это обычно смена видового состава в градиенте какого-либо фактора [20]. В данном случае можно отметить, что наблюдается тренд влияния концентраций растворов на показатели растений-акцепторов: наиболее высокие показатели всхожести и длины корней наблюдались при минимальной концентрации водных вытяжек (1:100), тогда как высокая концентрация (1:10) действовала подавляюще.

Местообитание. Вклад данного фактора в общую вариабельность показателей был минимален – 1,95%, и не был статистически

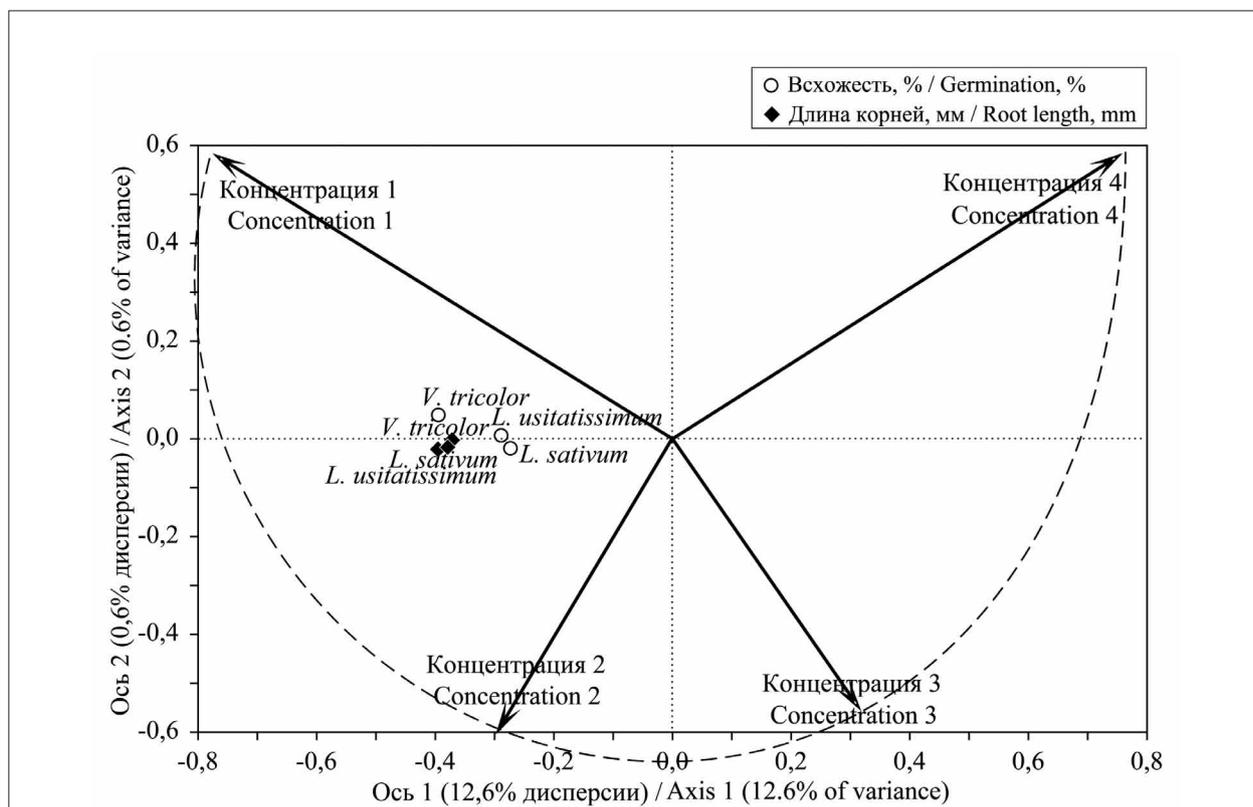


Рис. 3. Всхожесть и длина корня растений-акцепторов в пространстве концентраций водных растворов анализа избыточности (концентрации 1, 2, 3 и 4 равны 1:100, 1:50, 1:25 и 1:10 соответственно). Пунктир – «эффект арки» / **Fig. 3.** Germination and root length of acceptor plants in the space of Solution concentration of redundancy analysis (concentrations 1, 2, 3 and 4 are 1:100, 1:50, 1:25 and 1:10 respectively). Dashed line – “The arch effect”

Таблица 2 / Table 2

Иерархия влияния факторов на характеристики растений-акцепторов
Hierarchy of factors' effect on the characteristics of acceptor plants

Регрессор Regressor	Объяснённая дисперсия, % Variance explained, %	Оценка значимости Test of significance
Агенты переноса Transfer agents	35,4	$F_{(2/69)}=18,91$ $p<0,001$
Растения-доноры Donor plants	16,0	$F_{(2/69)}=6,58$ $p<0,001$
Концентрация раствора Solution concentration	12,6	$F_{(1/70)}=3,28$ $p=0,026$
Местообитание Locality	1,95	$F_{(1/70)}=1,39$ $p=0,24$
Всего / Total	66,01	$F_{(6/65)}=19,35$ $p<0,001$

значим: $F_{(1/70)}=1,39$; $p=0,24$. Поскольку в исследовании было только 2 типа местообитаний, для данного регрессора возможна только одна ось, и результаты нельзя представить на классической ординационной диаграмме, как было сделано для других рассмотренных факторов. Однако можно рассмотреть проекции переменных на эту ось, где отрицательные значения показателей будут соответствовать увеличению показателей всхожести и длины корня в естественных местообитаниях, а положительные – в искусственных. Максимальные нагрузки на ось RDA отразили длина корня и всхожесть кресс-салата (соответственно 0,382 и 0,336), меньшие – льна (0,130 и 0,316) и самые малые – фиалки (соответственно 0,121 и 0,112). Таким образом, все 6 показателей проявили только положительные нагрузки, что по критерию знаков соответствует вероятности отсутствия различий выявленных показателей между естественными и искусственными местообитаниями ($p=0,031$). Это можно увидеть и по усреднённым по всем прочим факторам значениям показателей, которые для 6 признаков всегда были больше в искусственных местообитаниях. В целом, роль данного фактора следует трактовать как слабую, пусть и неслучайную, тенденцию к росту значений всхожести и длины корня в искусственных местообитаниях, чуть более выраженную для кресс-салата.

Информация о вкладе всех 4 факторов в изменчивость показателей растений-акцепторов сведена в таблице 2.

Очевидно, что влияние агентов переноса на всхожесть и длину корней изученных растений в 2,2 раза превосходило влияние видовой принадлежности растений-доноров и в 2,8 раз – влияние всех ранее приведённых

концентраций водных растворов листьев, листового опада и почвы. Вклад местообитания был минимален и статистически незначим в рандомизационном дисперсионном анализе. В целом, все рассмотренные факторы вместе обусловили 2/3 общей дисперсии – 66,01%. Оставшуюся изменчивость с учётом дизайна проведённого эксперимента следует интерпретировать как взаимодействие изученных факторов.

Проведённый анализ аллелопатических эффектов *Q. robur*, *A. platanoides* и *U. glabra* с помощью многомерного метода доказал статистическую значимость и показал вклад каждого регрессора в дисперсию.

Выводы

1. Впервые установлена иерархия регрессоров по вкладу в дисперсию показателей, определяющих аллелопатическую активность видов-доноров *Q. robur*, *A. platanoides*, *U. glabra*.

2. Воздействие агентов переноса (листья, опад и почва прикорневой зоны) является статистически значимым ($F_{(2/69)}=18,91$; $p<0,001$) и демонстрирует вклад в дисперсию показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов на 35,4%. Это объясняется наличием аллелохимикатов различных групп в агентах переноса.

3. Регрессор вид-донор определяет меньшую вариабельность показателей всхожести и длины корня растений-акцепторов (16,0%) при статистической значимости ($F_{(2/69)}=6,58$; $p<0,001$). Наивысшим угнетающим действием на всхожесть семян и длину корней проростков биотестов отличается *Q. robur*. Самый низкий ингибирующий эффект на растения-

акцепторы выявлен под воздействием водных вытяжек листьев, листового опада и почвы *U. glabra*. Неоднозначное воздействие на *L. sativum*, *L. usitatissimum* и *V. tricolor* демонстрируют экстракты *A. platanoides*, наряду со стимулирующим действием на длину корней проростков тормозят всхожесть семян.

4. Многомерный анализ подтвердил статистически значимую обратную зависимость между концентрацией водных вытяжек из листьев, листового опада и почвы всех видов-доноров и ингибирующим эффектом на прорастание семян используемых биотестов.

5. Минимальный вклад в дисперсию выявлен у регрессора – тип местообитания. В градиенте между естественными и искусственными сообществами вклад в вариацию составляет 1,95% и не является статистически значимым. Это можно объяснить сходным воздействием «фитогенного поля» доноров в природных и искусственных сообществах, ценопопуляции которых приурочены либо к границе своего естественного ареала, либо выходят за его пределы, где в условиях конкуренции снижается аллелопатическая активность.

6. Представленное исследование показало целесообразность использования многомерного статистического анализа – применение анализа избыточности для сравнения аллелопатического влияния, отличающегося сложной природой и объективной трудностью обобщения показателей его воздействия.

Литература

1. Гродзинский А.М. Аллелопатия растений и почвоутомление: избр. тр. Киев: Наукова думка, 1991. 432 с.
2. Цандекова О.Л. Роль аллелопатического влияния *Acer negundo* L. на рост травянистых растений // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2020. № 1. С. 15–18. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/03
3. Veselkin D.V., Rafikova O.S. Effects of water extracts from the leaves of boxelder maple *Acer negundo* and native tree species on the early development of plants // Russ. J. Ecol. 2022. V. 53. P. 59–67. doi: 10.1134/S1067413622020084
4. Александров Д.С., Калашников Д.В. Влияние экстрактов листового опада клёна остролистного и клёна ясенелистного на прорастание семян и начальные этапы роста газонных трав и декоративных однолетников // Вестник ландшафтной архитектуры. 2019. № 19. С. 3–6.
5. Райс Э.Л. Аллелопатия. М.: Мир, 1978. 182 с.
6. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
7. Ашихмина Т.Я., Товстик Е.В., Адамович Т.А. Экологические факторы, определяющие естественную

и антропогенную инвазию борщевика Сосновского *Hieracium sosnowskyi* Manden., меры борьбы с ним (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 20–31. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-020-031

8. Матвеев Н.М. Аллелопатия как фактор экологической среды. Самара: Самар. кн. изд-во, 1994. 206 с.

9. Кузьмин П.А., Бухарина И.Л. Биохимический состав листьев клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) в урбаноосреде // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2020. № 1. С. 48–53. doi: 10.17072/1994-9952-2020-1-48-53

10. Callaway R.M., Ridenour W.M. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability // Front. Ecol. Environ. 2004. V. 2. No. 8. P. 436–443. doi: 10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NW-ISAT]2.0.CO;2

11. Li Z.H., Wang Q., Ruan X., Pan C.D., Jiang D.A. Phenolics and plant allelopathy // Molecules. 2010. V. 15. No. 2. P. 8933–8952. doi: 10.3390/molecules15128933

12. Кондратьев М.Н., Ларикина Ю.С., Дёмина О.С., Скороходова А.Н. Роль экссудатов семян и корней во взаимодействиях между растениями разных видов в ценозе // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2020. № 2. С. 40–53. doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-40-53

13. Германец И.А., Левченко П.В., Мальцева Т.А. Биоморфологический подход к изучению аллелопатического воздействия *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. 2021. № 2 (38). С. 15–26. doi: 10.32516/2303-9922.2021.38.2

14. Шитиков В.К., Матицкий С.Э. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R. Тольятти: Creative Commons, 2017. 351 с.

15. Jolliffe I.T. Principal Component analysis. New York, NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.

16. Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlenn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. Package 'vegan'. Community Ecology Package Version 2.6-4 [Электронный ресурс] <https://github.com/vegandevs/vegan> (Дата обращения: 18.12.2023).

17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Электронный ресурс] <https://www.R-project.org> (Дата обращения: 18.12.2023).

18. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. Л.: Судостроение, 1980. 384 с.

19. Palmer M.W. Ordination methods – an overview [Электронный ресурс] <http://ordination.okstate.edu/overview> (Дата обращения: 18.12.2023).

20. Podani J., Miklós I. Resemblance coefficients and the horseshoe effect in principal coordinates analysis // Ecology. 2002. V. 83. No. 12. P. 3331–3343. doi: 10.2307/3072083

References

1. Grodzinsky A.M. Allelopathy of plants and soil fatigue: Selected Works. Kiev: Naukova Dumka, 1991. 432 p. (in Russian).
2. Tsandekova O.L. The role of allelopathic influence of *Ase negundo* L. on the growth of herbaceous plants // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2020. No. 1. P. 15–18 (in Russian). doi:10.36906/2311-4444/20-1/03
3. Veselkin D.V., Rafikova O.S. Effects of water extracts from the leaves of boxelder maple *Acer negundo* and native tree species on the early development of plants // Russ. J. Ecol. 2022. V. 53. P. 59–67. doi: 10.1134/S1067413622020084
4. Aleksandrov D.S., Kalashnikov D.V. Effect of extracts of leaf fall of the sharp-leaved maple and ash-leaved maple on seed germination and initial stages of growth of lawn grasses and ornamental annuals // Vestnik landshaftnoy arkhitektury. 2019. No. 19. P. 3–6 (in Russian).
5. Rice E.L. Allelopathy. Moskva: Mir, 1978. 182 p. (in Russian).
6. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1998. 853 p.
7. Ashikhmina T.Ya., Tovstik E.V., Adamovich T.A. Ecological factors determining natural and anthropogenic invasion of *Heracleum sosnowskyi* Manden., measures to combat it (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 20–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-020-031
8. Matveev N.M. Allelopathy as a factor of ecological environment. Samara: Samara Book Publishing House, 1994. 206 p. (in Russian).
9. Kuzmin P.A., Bukharina I.L. The biochemical composition of the leaves of agricultural maple (*Acer platanoides* L.) in the urban environment // Vestnik Permskogo Universiteta. Biology. 2020. No. 1. P. 48–53 (in Russian). doi: 10.17072/1994-9952-2020-1-48-53
10. Callaway R., Ridenour W. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability // Front. Ecol. Environ. 2004. V. 2. No. 8. P. 436–443. doi: 10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NW-ISAT]2.0.CO;2
11. Li Z.H., Wang Q., Ruan X., Pan C.D., Jiang D.A. Phenolics and plant allelopathy // Molecules. 2010. V. 15. No. 2. P. 8933–8952. doi: 10.3390/molecules15128933
12. Kondratiev M.N., Larikova Y.S., Demina O.S., Skorokhodova A.N. Exudates of seeds and roots as a cenosis interaction means of different plants species // Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2020. No. 2. P. 40–53 (in Russian). doi: 10.26897/0021-342X-2020-2-40-53
13. Getmanets I.A., Levchenko P.V., Maltseva T.A. Biomorphological approach to the study of allelopathic effects of *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus glabra* Huds. // Bulletin of the Orenburg State Pedagogical University. 2021. No. 2 (38). P. 15–26 (in Russian). doi: 10.32516/2303-9922.2021.38.2
14. Shitikov V.K., Mastitskiy S.E. Classification, regression, Data Mining algorithms using R. Tolyatti: Creative Commons, 2017. 351 p. (in Russian)
15. Jolliffe I.T. Principal Component analysis. New York, NY: Springer-Verlag, 2002. 486 p.
16. Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. Package 'vegan'. Community Ecology Package Version 2.6-4 [Internet resource] <https://github.com/vegandevs/vegan> (Accessed: 18.12.2023).
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Austria, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016 [Internet resource] <https://www.R-project.org> (Accessed: 18.12.2023).
18. Montgomery D.K. Experiment panning and data analysis. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 384 p. (in Russian).
19. Palmer M.W. Ordination methods – an overview [Internet resource] <http://ordination.okstate.edu/overview> (Accessed: 18.12.2023).
20. Podani J., Miklós I. Resemblance coefficients and the horseshoe effect in principal coordinates analysis // Ecology. 2002. V. 83. No. 12. P. 3331–3343. doi: 10.2307/3072083

Исследование рациона сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) с использованием нейронных сетей компьютерного зрения

© 2025. И. А. Усатов¹, к. б. н., м. н. с., И. С. Труханова², к. б. н., исследователь, В. Н. Бурканов^{2,3}, к. б. н., исследователь, А. В. Алтухов^{2,3}, к. б. н., исследователь,
¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Пальчевского, д. 17,
²Консалтинговая компания по дикой природе Северной Пацифики, 98155, Соединённые штаты Америки, г. Сиэтл, 185-я улица СВ, 3202,
³Лаборатория по изучению морских млекопитающих Аляскинского рыбохозяйственного центра НСМР/НОАА, 98115, Соединённые штаты Америки, г. Сиэтл, Сэнд Пойнт Вей СВ, 7600, Строение 4, e-mail: usatov.ivan.alex@gmail.com

Исследовали возможность использования компьютерного зрения для определения состава рациона питания сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) по изображениям непереваренных структур в образцах экскрементов. Нейронные сети на основе компьютерного зрения обеспечивают автоматизацию извлечения данных из визуальных изображений, что делает их привлекательными для использования в биологических исследованиях. Мы использовали нейросетевую модель VGG 16, обученную на данных ImageNet, для идентификации непереваренных остатков в экскрементах сивуча. Исследовали 19 типов костей и отолитов 13 видов объектов питания, входящих в рацион сивуча, и получили 1513 фотографий. Модель была обучена на 1469 фотографиях, и точность обучения составила 99%. Тестирование показало, что модель идентифицирует костные структуры поглощённых кормовых объектов со 100% точностью.

Ключевые слова: сивуч, диета, компьютерное зрение, нейронные сети.

Steller sea lion *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) diet study using computer vision neural networks

© 2025. I. A. Usatov¹ ORCID: 0000-0003-1249-7002, I. S. Trukhanova² ORCID: 0000-0001-9058-4481, V. N. Burkanov^{2,3} ORCID: 0000-0002-0129-7884, A. V. Altukhov^{2,3} ORCID: 0000-0001-8532-0596,
¹A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology FEB RAS, 17, Palchevskogo St., Vladivostok, Russia, 690041,
²North Pacific Wildlife Consulting, 3202, 185th St., NE, Seattle, WA, USA, 98155,
³Marine Mammal Laboratory, AFSC, NMFS, NOAA, 7600, Sand Point Way NE, Building 4, Seattle, WA, USA, 98115, e-mail: usatov.ivan.alex@gmail.com

We assessed the potential of using a computer vision-based neural network to identify undigested parts of the diet in Steller sea lion feces samples. These samples were previously examined and identified by experts. We studied 19 types of bones and otoliths from 13 fish species found in the diet samples and accurately identified by expert morphologists. Each object was photographed against a black background in various projections using a microscope with a +10–15 magnification. This process resulted in 1513 photographs. To identify the undigested diet parts, we utilized the neural network model VGG 16, pre-trained on ImageNet data containing 1.4 million animal and plant images. The model was trained on 1469 photographs of diverse food residues using the R environment and the 'keras' package. The training accuracy over 60 epochs reached 99%. We tested the model on 44 images of Steller sea lion diet objects, not used during the training process. The model accurately identified fish remains with 100% accuracy. Computer vision enables quick and precise identification of food residues, reducing the analysis time and cost. It automates the identification process, eliminating human error. Our experiment involved a small data set and needs further research. To improve the feeding objects' identification accuracy, a larger data set should be used, and the model should be validated on ad-

ditional test data. The main challenge of using computer vision to identify fish bones is obtaining sufficient photographs of different types of undigested food remains at different stages of digestion from all potential Steller sea lion prey items.

Keywords: Steller sea lion, diet, computer vision, neural networks.

Численность сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) сократилась за последнее столетие [1] и до сих пор не восстановилась на большей части своего ареала. Причины сокращения популяций этого вида в прошлом и отсутствия положительных тенденций в настоящем остаются дискуссионными. По мнению некоторых учёных, наблюдаемое снижение численности может быть связано с недостатком корма или ухудшением его качества [2].

Определение диеты морских зверей в прошлом осуществлялось методом анализа непереваренных остатков пищи, извлекаемых из пищеварительной системы добытых животных, включая содержимое желудка и кишечника [3–7]. После снижения численности сивуча, добыча этого вида стала невозможна, и основным методом изучения его питания стал копрологический анализ, – сбор и исследование непереваренных остатков пищи в экскрементах [8, 9].

Определение рыб, отолитов и клювов кальмаров, которые находятся в различной степени переваривания, является сложным процессом, требующим значительного количества времени и специалистов очень специфической квалификации. Таких специалистов в мире немного. В связи с этим, многие исследователи, работающие в северной части Тихого океана для идентификации пищевых остатков, выделенных из экскрементов, обращаются в специализированную лабораторию Pacific IDentifications Inc., расположенную в г. Виктория, Британская Колумбия (www.pacificid.com). Стоимость разбора и идентификации состава одной пробы питания в этой лаборатории высока, а, к примеру, минимальное количество проб для достоверного сравнения частоты встречаемости объектов питания между исследуемыми группами (годами, месяцами, лежбищами и т. п.) сивуча должно составлять 94 пробы на одну группу [10]. Таким образом, высокие финансовые затраты на идентификацию пищевых остатков в образцах питания являются серьёзным препятствием для регулярного мониторинга рациона этого вида у побережья Азии.

В рамках исследований по изучению причин снижения численности сивуча у азиатского побережья мы собрали 2987 образцов экскрементов животных в период с 2004 по

2016 гг. (рис. 1). Однако только 916 из них были идентифицированы специалистами лаборатории Pacific IDentifications Inc. для анализа состава пищи. Результаты исследования питания сивуча у побережья Азии были опубликованы в ряде статей [11–13]. Из-за недостатка финансирования до настоящего времени остаются не разобранными и не исследованными 2071 образцов питания.

Последние годы характеризуются развитием нейронных сетей на основе компьютерного зрения, которые позволяют автоматизировать процесс извлечения данных с визуальных изображений. Примеры использования компьютерного зрения в биологии включают не только анализ изображений морских организмов, но и распознавание растительного покрова на снимках спутников, анализ медицинских изображений и многое другое [14–21]. В настоящем исследовании мы проверили возможность использования нейронной сети на основе компьютерного зрения для идентификации непереваренных частей диеты из образцов экскрементов сивуча, которые ранее были просмотрены и идентифицированы экспертами. При этом ставили следующие задачи.

Подготовить модель компьютерного зрения на основе глубокого обучения для идентификации объектов питания сивуча на изображениях.

Провести фотосъёмку идентифицированных фрагментов объектов питания сивуча.

Систематизировать полученные фотоснимки фрагментов объектов питания сивуча для их использования в обучении модели компьютерного зрения.

Обучить модель компьютерного зрения.

Проверить, насколько достоверно модель компьютерного зрения может быть использована для исследований питания сивуча.

Определить недостатки использования компьютерного зрения в исследованиях рациона сивуча и варианты решения выявленных недостатков.

Материал и методы исследований

Материалом для настоящей работы послужили идентифицированные твёрдые непереваренные остатки пищи, обнаруженные в остатках экскрементов сивуча. Идентифи-

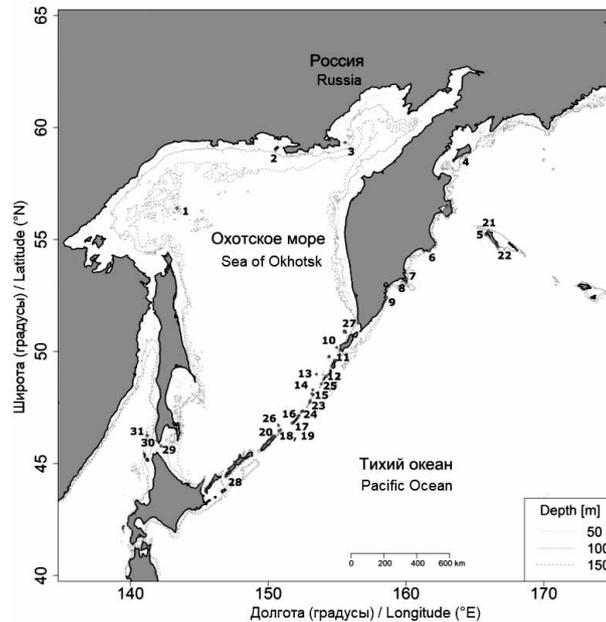


Рис. 1. Места сбора проб экскрементов сивуча в 2004–2016 гг. на лежбищах Дальнего Востока России. Названия лежбищ указаны в таблицах 1 и 2 в соответствии с номером на карте
Fig. 1. Locations of Steller sea lion feces samples collected in 2004–2016 at rookeries in the Russian Far East. The names of rookeries are given in Table 1 and 2 according to the number on the map

Таблица 1 / Table 1

Количество проб экскрементов, собранных на лежбищах Дальнего Востока России в 2004–2008 гг. (идентифицированные и проанализированные образцы) / Number of feces samples collected from rookeries in the Russian Far East in 2004–2008 (identified and analyzed samples)

№	Лежбище / Sites	Регион Region	Год / Year				Всего Total
			2004	2006	2007	2008	
1	о. Ионы / Iony Is. (R)	ОКН	55	50	0	0	105
2	о. Завьялова / Zavyalova Is.		0	9	0	0	9
3	о-ва Ямские (R) / Yamskie Is.		41	0	0	0	41
4	о. Карагинский / Karaginsky Is.	КС	13	0	0	0	13
5	о. Арий камень / Ary Rock Is.		0	13	0	6	19
6	Камень Козлова (R) / Kozlova Cape		46	77	0	28	151
7	б. Железная / Zheleznaya Bay		22	0	0	0	22
8	м. Шипунский / Shipunsky Cape		16	0	0	0	16
9	м. Кекурный / Kekurny Cape		67	34		24	125
10	о. Анциферова (R) / Antsiferova Is.		0	0	35	0	35
11	о. Онекотан / Onokotan Is.	49	0	24	0	73	
12	о. Шиашкотан, м. Красный Shiashkotan Is., Krasny Cape	KUR	0	0	31	44	75
13	о. Чиринкотан / Chirinkotan Is.		0	0	20	0	20
14	о. Райкоке (R) / Raikoke Is.		0	0	25	0	25
15	о. Матуа / Matua Is.		22	0	0	0	22
16	о. Симушир, м. Ск. Красноватая Simushir Is. Krasnovataya Cape Rock		19	0	0	0	19
17	о. Симушир, м. Аронт / Simushir Is., Aront Cape		26	0	31	0	57
18	о. Чирной, м. Удушливый Chirnoy Is., Udushlivy Cape		18	0	0	0	18
19	о. Брат Чирпоев (R) / Brat Chirpoyev Is.		0	0	34	0	34
20	о. Уруп, ск. Чайка / Urup Is. Chaika Rock		37	0	0	0	37
Итого / All			431	183	200	102	916

Примечание: R – репродуктивные лежбища; ОКН – Охотское море; КС – Камчатка и Командорские острова; KUR – Курильские острова; JP – Японское море / Note: R – reproductive rookery; ОКН – Sea of Okhotsk; КС – Kamchatka and the Commander Islands; KUR – Kuril Islands; JP – Japan Sea.

Таблица 2 / Table 2

Количество проб экскрементов, собранных на лежбищах Дальнего Востока России в летний период 2009–2016 гг. (не идентифицированные и не проанализированные образцы) / Number of feces samples collected from rookeries in the Russian Far East during the summer period 2009–2016 (samples were not identified and analyzed)

ID	Лежбище / Site	Регион Region	Год / Year								Всего Total
			2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
1	о. Ионы (R) / Iony Is.	ОМ	0	0	49	0	0	0	0	0	49
3	о-ва Ямские (R) / Yamskie Is.		0	0	55	0	0	0	0	0	55
21	о. Беринга, м. Юшина Beringa Is. Yushina Cape	КС	0	0	0	10	0	0	0	0	10
5	о. Арий камень Ary Rock Is.		0	0	0	101	0	0	5	0	106
22	о. Беринга, м. Монати Beringa Is. Monati Cape		0	0	0	0	0	0	31	30	61
6	Камень Козлова (R) Kozlova Cape		0	0	0	56	29	60	47	0	192
7	б. Железная Zheleznaaya Bay		0	0	0	0	0	0	30	0	30
9	м. Кекурный Kekurny Cape		23	10	0	0	0	17	27	27	104
10	о. Анциферова (R) Antsiferova Is.		KUR	26	60	69	0	0	0	0	0
11	о. Онекотан / Onekotan Is.	KUR	0	0	0	43	0	0	0	0	43
13	о. Чиринкотан Chirinkotan Is.		0	0	0	56	0	0	0	0	56
23	Скалы Ловушки (R) Lovushky Rocks		71	0	0	0	0	0	0	0	71
14	о. Райкоке / Raikoke Is.		30	110	68	0	0	0	0	0	208
24	о. Расшуа, м. Северный Rasshua Is., Severny Cape		0	0	0	44	0	0	0	0	44
25	о. Кетой, м. Лежбищный Ketoi Is., Lezhbishchny Cape		34	0	0	18	0	0	0	0	52
16	о. Симушир, м. Ск. Красноватая / Simushir I. Krasnovataya Cape Rock		0	0	62	0	0	0	0	0	62
17	о. Симушир, м. Аронт Simushir I, Aront Cape		0	0	0	53	0	0	0	0	83
26	о. Броутона, м. Сивучий Broughton Is., Sivuchy Cape		0	0	0	42	0	0	0	0	42
19	о. Брат-Чирпоев (R) Vrat Chirpoyev Is.		31	80	68	0	0	0	0	0	179
27	Сивучий камень (западный) / Sivuchy Cape (west)		0	0	56	0	0	0	0	0	56
20	о. Уруп, скала. Чайка Urup Is. Chaika Rock	0	0	65	0	0	0	0	0	65	
28	о. Итуруп, м. Рикорда Iturup Is. Rikorda Cape	40	0	0	0	0	0	0	0	40	
29	Скала Опасности Opasnosty Rock	JP	41	0	45	0	0	0	0	0	86
30	о. Сахалин, м. Кузнецова Sakhalin Is., Kuznetsova Cape		40	0	53	0	0	0	0	0	93
31	о. Монерон / Moneron Is.		59	0	70	0	0	0	0	0	129
Итого / All			425	260	660	423	29	77	140	57	2071

Примечание: R – репродуктивные лежбища; ОКН – Охотское море; KUR – Курильские острова; КС – Камчатка и Командорские острова; JP – Японское море / Note: R – reproductive rookery; ОКН – Sea of Okhotsk; KUR – Kuril Islands; КС – Kamchatka and the Commander Islands; JP – Japan Sea.

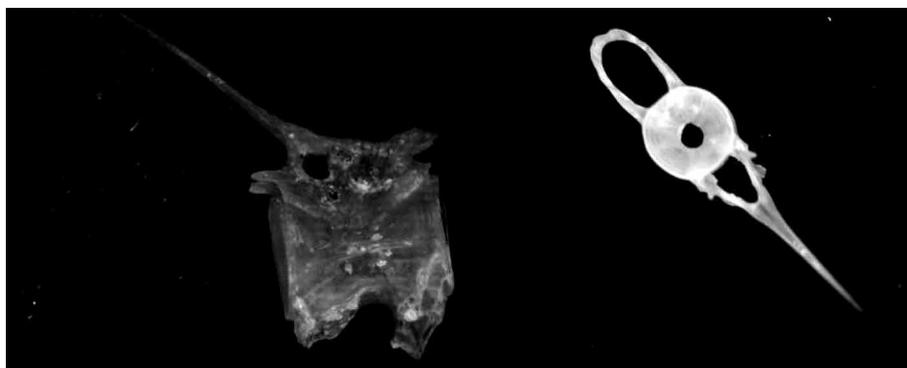


Рис. 2. Пример съёмки костной структуры в двух проекциях (Vertebrae, *Ammodytes hexapterus*)
Fig. 2. Example of bony structure imaging in two projections (Vertebrae, *Ammodytes hexapterus*)



Рис. 3. Пример съёмки костной структуры в трёх проекциях (*Angular Pleurogrammus monopterygius*)
Fig. 3. Example of bone structure imaging in three projections (*Angular Pleurogrammus monopterygius*)

цированные образцы питания были собраны в летний период 2004–2008 гг. на лежбищах сивуча вдоль побережья Азии (рис. 1, табл. 1) [11–13]. Поэтому экскременты содержали остатки наиболее характерной добычи сивуча в летнее время и только этого региона.

Специалисты-морфологи компании Pacific IDentifications Inc., Victoria, Британская Колумбия (www.pacificid.com) идентифицировали указанные непереваренные фрагменты до минимально возможного таксономического уровня. Определённые специалистами-морфологами твёрдые остатки пищи являлись материалом для настоящей работы. Просматривая набор костных структур каждого образца, морфологи выделяли наиболее характерные и идентифицируемые структуры и определяли их принадлежность к виду, роду или семейству. В каждой пробе идентифицировали только одну особь, даже если было очевидно, что кости принадлежали разным возрастным группам, все костные остатки группировали, как принадлежащие к одному объекту добычи.

В рамках нашей работы рассматривали уже идентифицированные специалистами костные структуры.

Оборудование. Для получения изображений твёрдых структур размером менее 1 см использовали многолинзовый стереомикроскоп 20X-40X с боковой настраиваемой

подсветкой и цифровую окулярную фотокамеру 3 Мп. Структуры размером больше 1 см снимали на портативный микроскоп Q-Scope 10X-40X, 180X 1.2MP со светодиодной подсветкой.

Цифровое изображение транслировалось на персональный ноутбук с использованием программного обеспечения для камер AmScore.

Методы фотосъёмки. Брали пробу, в пределах которой был предоставлен набор разделённых костей по объектам добычи. Каждый объект добычи был предоставлен набором костей с указанием названия кости в составе скелета. Помещали каждую идентифицированную структуру на чёрный фон под микроскоп и выполняли её фотосъёмку в проекциях на плоскости (рис. 2, 3). Каждому фотоснимку присваивали имя, включающее название объекта питания, название костной структуры и порядковый номер проекции для данной структуры. Примером может служить позвонок, внешний вид которого может существенно меняться в зависимости от его положения в горизонтальной плоскости. В этих случаях рассматривали две проекции – сверху и сбоку. Проекция на плоскости имела важное значение для успешной идентификации, так как в зависимости от ракурса одна и та же кость может выглядеть совершенно различно (рис. 2). Именно поэтому снимали кости во

всех проекциях, в которых кость может располагаться на горизонтальной плоскости.

Структура данных. Фотографии были структурированы по категориям «название объекта питания», «название кости», «порядковый номер проекции снимка».

Подготовка цифровых данных к обучению модели идентификации. Весь набор изображений был разделён на иерархические группы в зависимости от внешнего вида костной структуры: позвонки (Vertebra), фрагменты жабр (Gill rakers), отолиты (Otolith), клювы головоногих моллюсков (Beak), линзы глаз головоногих моллюсков (Eye lense), кости остальные (Else). Мы обработали 134 образца экскрементов, на которых были сфотографированы фрагменты 310 объектов питания. Общее число костей, снятых на 1513 снимках, составило 581 (каждая косточка может быть представлена от 1 до 3 проекций – отдельных снимков).

Архитектура модели компьютерного зрения, используемая для идентификации костных структур. Для выполнения задач идентификации и категоризации изображений использовали модель компьютерного зрения с глубоким обучением VGG16 [18]. Модель состоит из 23 слоёв и содержит 138 357 544 нейронов (табл. 3).

Наши задачи требовали изменения модели, чтобы она могла категоризировать изображения костных структур. Мы произвели обучение только последних двух слоёв модели на наборе данных с изображениями костных структур.

VGG16 является одной из наиболее широко используемых моделей глубокого обучения в области компьютерного зрения. Она была разработана в 2014 г. и зарекомендовала себя во многих задачах, связанных с обработкой изображений. Модель хорошо справляется с задачами классификации идентификации, а также сегментации

Таблица 3 / Table 3

Структура модели VGG16, используемая в обучении для идентификации костных структур
The architecture of the VGG16 model used in training to identify bone structure

Название слоя / Layer name	N	Обучение / Training
input_1 (InputLayer)	0	–
block1_conv1 (Conv2D)	1792	ImageNet
block1_conv2 (Conv2D)	36928	ImageNet
block1_pool (MaxPooling2D)	0	ImageNet
block2_conv1 (Conv2D)	73856	ImageNet
block2_conv2 (Conv2D)	147584	ImageNet
block2_pool (MaxPooling2D)	0	ImageNet
block3_conv1 (Conv2D)	295168	ImageNet
block3_conv2 (Conv2D)	590080	ImageNet
block3_conv3 (Conv2D)	590080	ImageNet
block3_pool (MaxPooling2D)	0	ImageNet
block4_conv1 (Conv2D)	1180160	ImageNet
block4_conv2 (Conv2D)	2359808	ImageNet
block4_conv3 (Conv2D)	2359808	ImageNet
block4_pool (MaxPooling2D)	0	ImageNet
block5_conv1 (Conv2D)	2359808	ImageNet
block5_conv2 (Conv2D)	2359808	ImageNet
block5_conv3 (Conv2D)	2359808	ImageNet
block5_pool (MaxPooling2D)	0	ImageNet
flatten (Flatten)	0	–
fc1 (Dense)	102764544	Train
fc2 (Dense)	16781312	Train
predictions (Dense)	–	–

Примечание: N – число параметров обучения (нейронов); ImageNet – слой не обучался, использовались веса ImageNet; Train – обученный слой; «–» – слой модели не обучался.

Note: N – number of training parameters (neurons). ImageNet – layer was not trained, ImageNet weights were used. Train – layer trained. “–” – layer was not trained.

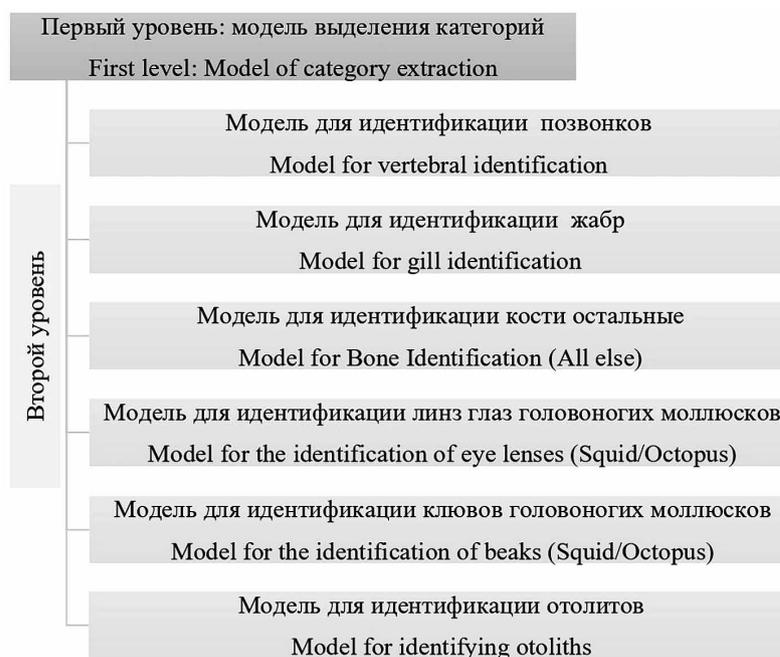


Рис. 4. Иерархия моделей компьютерного зрения на основе VGG16, используемых для идентификации костных структур
 Fig. 4. Hierarchy of VGG16-based computer vision models used to identify bone structures

и детектирования объектов на изображении. Данная модель достигает высоких показателей в задачах распознавания изображений, сравнимых с человеческими [18]. Модель VGG16 была использована нами с весами, обученными на более чем 1,5 млн изображений набора данных ImageNet [22]. Этот набор изображений включает в себя основные визуальные представления окружающего мира и является одним из наиболее широко используемых наборов данных для обучения нейронных сетей. Мы заморозили веса ImageNet, обучая только 2 из 23 слоёв модели VGG16 (табл. 3).

В ходе нашего исследования мы использовали каскад моделей для идентификации костных структур на изображениях (рис. 4). Первая модель была ответственна за выделение групп костных структур первого уровня, которые состояли из шести категорий (позвонки, жабры, отолиты, клювы головоногих моллюсков, линзы глаз головоногих моллюсков, кости остальные).

Каждая модель второго уровня (рис. 4) обучалась нами идентифицировать только те остатки, которые были сгруппированы для неё. Каскад моделей второго уровня определял конкретное название кости и проекцию, в которой находилась данная костная структура.

В итоге, каскад моделей, который мы использовали, состоял из двух уровней. Первый уровень выделял группы костных структур,

а второй уровень определял конкретные костные структуры внутри этих групп до конкретного объекта питания.

Обучение. Для подготовки моделей использовался компьютер с видеокартой NVIDIA 1070. Обучение проводилось в течение 30 эпох [23]. Для предварительной подготовки данных, обучения и предсказания использовалась программная среда R (r-project.org), пакеты keras (keras.io) и tensorflow (tensorflow.rstudio.com). При обучении использовалась скорость машинного обучения $\text{lr} = 0,0001$ и снижение интенсивности после достижения плато $\text{decay} = 1^{-6}$ [24]. Использовался оптимизатор Adam, оценивающий эффективность процесса обучения [23]. Качество обучения модели оценивалось по величине валидации. Для этого отбирался набор данных, составляющий 10% от обучающего массива. Тестирование алгоритма проводилось на дополнительных 44 изображениях, не вошедших в тренировочный и валидационный наборы данных. Для улучшения эффективности обучения использовали аугментацию изображений [25] с помощью встроенных средств пакета keras. Были применены следующие приёмы: случайный поворот изображений на угол, кратный 90 градусам, зеркальное отражение изображения, изменение яркости, контрастности, масштабирование и снижение качества изображения. Обученные модели были сохранены в формате h5 [23].

Идентификации костных структур. Каждая костная структура, найденная в пробе экскремента, фотографировалась под цифровой камерой микроскопа на чёрном фоне во всех положениях, которые она принимала на горизонтальной плоскости. Набор полученных фотоснимков передавали на предсказание модели первого уровня, а сгруппированные изображения согласно результатам её предсказания использовали для моделей второго уровня. Результатом предсказания модели второго уровня являлось название кормового объекта, название костной структуры и её проекция, а также достоверность автоматической идентификации, оценённая моделью. Достоверность автоматической идентификации, оценённая моделью, распределялась пропорционально между всеми кормовыми объектами (категориями), известными модели, где 100% – полное совпадение, 0% – полное несовпадение. Для наших целей мы использовали один кормовой объект, получивший максимальный процент доверия модели, без учёта фактической величины.

Результаты полученных автоматических идентификаций сверяли с результатами, полученными ранее специалистами-морфологами. Точность идентификации морфологами принимали за 100%, так как мы не могли оценить

человеческий фактор ошибки. Смотрели соответствие видового списка и идентифицированных фрагментов. Считали число верных и неверных идентификаций относительно общего числа изображений. Точность оценивалась в процентах, как отношение количества правильных идентификаций к общему количеству кормовых объектов на снимках.

Результаты и обсуждение

В 916 образцах экскрементов сивуча специалисты-морфологи обнаружили остатки 2359 объектов добычи из 65 таксономических групп гидробионтов (табл. 4). Нами были использованы в эксперименте только 134 пробы экскрементов (14,16% от всех доступных к обработке), на которых были сфотографированы остатки 310 объектов питания (13,1% от всех доступных к обработке). Таким образом, наш эксперимент отражает лишь предварительные результаты.

Согласно результатам работ специалистов-морфологов, только 2,8% объектов питания были определены по отолитам. В большинстве случаев объекты питания идентифицируются по костям нижней части черепной коробки, жаберной дуге, позвонкам – в сумме 66,5% идентификаций. Поэтому именно эти костные структуры должны быть в центре внимания

Таблица 4 / Table 4
Основные элементы скелета объектов питания сивуча, идентифицированные в экскрементах
Main skeletal elements of Steller sea lion food items identified in feces

Элемент скелета / Body skeleton element	Категория / Category	Количество / Amount*	%
Отолит / Otolith	Otolith	66	2,8
Верхняя часть черепной коробки (за исключением отолитов) / Upper part of the cranium (excluding otoliths)	Else	55	2,3
Нижняя часть черепной коробки и верхняя челюсть (за исключением клюва) / Lower cranium and upper jaw (excluding beak)	Else	519	22,0
Подъязычная дуга / Hyoid arch	Else	252	10,7
Жаберная дуга / Gill arch	Gill rakers	576	24,4
Плечевой пояс, грудные плавники / Pectoral girdle, pectoral fins	Else	56	2,4
Тазовый пояс, брюшные плавники / Pelvic girdle, pelvic fins	Else	3	0,1
Чешуя/шипы / Scales/spikes	Else	145/76	9,4
Хвостовой плавник / Caudal fin	Else	15	0,6
Позвонки / Vertebrae	Vertebra	473	20,1
Позвоночный столб (не включая позвонки) / Vertebral column (not including vertebrae)	Else	19	0,8
Линзы глаз (кальмара, осьминога) / Eye lenses (squid, octopus)	Eye lense	14	0,6
Клювы (кальмара, осьминога) / Beaks (squid, octopus)	Beak	60	2,5
Другое / Other	Else	30	1,3
Всего / Total	All	2359	100,0

*Примечание: * использован только один, наиболее идентифицируемый элемент скелета для каждого объекта питания в пробе.*

*Note: * only one, the most identifiable skeletal element for each food item in the sample was used.*

будущих усилий по автоматизации идентификации кормовых объектов сивуча.

При обучении модели компьютерного зрения VGG16 точность, оцениваемая по набору данных валидации, составила 99% для модели категоризации (первый уровень идентификации) и значения, близкие к 100% для моделей второго уровня. Для тестирования точности идентификации использовались 44 кости, соответствующие 12 объектам питания сивуча. Результат предсказания показал, что модель первого уровня разделила костные структуры со 100% точностью (категории: позвонки, жабыры, отолиты, клювы головоногих моллюсков, линзы глаз головоногих моллюсков, кости остальные). Второй порядок моделей смог идентифицировать все фрагменты также с точностью 100%.

Наши результаты демонстрируют возможность полной и достоверной идентификации непереваренных структур с использованием моделей компьютерного зрения. Однако следует учитывать, что нами были рассмотрены только 1469 изображений для обучения и 44 фотографии различных костных структур для проверки.

При проведении автоматизированной идентификации возникает проблема определения редко регистрируемых типов костей и объектов добычи. С ростом разнообразия данных увеличивается количество категорий анализа, что может привести к снижению точности их идентификации. Для решения этой проблемы необходима дополнительная работа по расширению каталогов идентифицируемых костных останков. Однако расширение каталогов не является единственным решением проблемы. Также необходим акцентированный сбор снимков костных структур редко встречаемой добычи сивуча. Без этого изображения редко регистрируемых типов костей и видов жертв будут представлены в каталогах в меньшем количестве, что приведёт к менее точному анализу. Поэтому необходим акцентированный сбор изображений, чтобы каждый вид рыб или головоногих моллюсков имел равные шансы на идентификацию, независимо от полноты справочных каталогов – определителей.

Однако заполнить каталоги редко встречающимися объектами питания сивучей довольно сложно. Для этой цели можно использовать непереваренные твёрдые структуры, взятые из экскрементов других видов тюленей, например северного морского котика *Callorhinus ursinus* (Linnaeus, 1758), ларги *Phoca largha* (Pallas, 1811). В условиях искусственного содержания тюленей можно кормить известными видами

рыб, чтобы получить эрозированные, прошедшие через желудочно-кишечный тракт костные структуры, которые можно использовать для пополнения фотокаталогов. Такой подход позволяет получить более широкий спектр костных структур.

Модели компьютерного зрения способны идентифицировать сложно воспринимаемые визуальные различия костей, поэтому можно использовать для идентификации все доступные костные структуры. Визуальное сравнение костной структуры с референтным изображением требует значительных усилий и времени, в то время как компьютер может выполнить сопоставление и идентификацию практически мгновенно. Поэтому для автоматизированной идентификации можно использовать все твёрдые непереваренные остатки пищи, в отличие от экспертной идентификации.

Заключение

Результат нашего эксперимента показал, что современные модели глубокого обучения могут быть успешно использованы для идентификации изображений костей рыб и остатков головоногих моллюсков.

Несмотря на высокую точность моделей компьютерного зрения, которую мы наблюдали в наших экспериментах, в настоящее время они всё же не могут полностью заменить человека при идентификации объектов питания сивуча. Некоторую часть проб, особенно те, что имеют редко встречающиеся или сложные структуры, необходимо идентифицировать вручную. Точность распознавания может зависеть от особенностей конкретных костных структур. Основные категории структур, которые были успешно идентифицированы нами, включают позвонки, жабыры, отолиты, клювы головоногих моллюсков и линзы глаз головоногих моллюсков. Однако наш эксперимент не показал специфики точности идентификации в зависимости от типа кости или категории костной структуры. Причиной этого является ограниченность проб и мест сбора экскрементов в нашем исследовании, что не позволяет учесть всё разнообразие костных структур объектов питания сивуча. Эту задачу необходимо выполнить в дальнейших работах. В этом контексте, для улучшения точности идентификации и обработки более разнообразных данных, требуется расширение каталогов идентифицируемых костных останков и акцентированный сбор изображений редко встречаемых объектов питания. Для этого можно использо-

вать непереваренные структуры, полученные из экскрементов других видов тюленей или из экспериментальных образцов, полученных при искусственном кормлении известными видами рыб или головоногих моллюсков.

Работа выполнена на базе «Приморского океанариума» – филиала НИЦМБ ДВО РАН, Владивосток.

Сбор и идентификация проб выполнены при финансовой поддержке Alaska Fisheries Science Center NOAA Fisheries, Alaska SeaLife Center и North Pacific Wildlife Consulting, LLC.

References

- Burkanov V.N., Loughlin T.R. Distribution and abundance of Steller sea lions, *Eumetopias jubatus*, on the Asian coast, 1720's – 2005 // *Mar. Fish. Rev.* 2005. V. 67. No. 2. P. 1–62.
- Steller sea lion decline: is it food II / Eds. D. DeMaster, S. Atkinson. Univ. Alaska Sea Grant, AK-SG-02-02. Fairbanks, AK, 2002. 80 p.
- Imler R.H., Sarber H.R. Harbor seals and sea lions in Alaska. *Spec. Sci. Rep. No. 28.* Washington, D.C.: U.S. Fish Wildl. Serv., 1947. 22 p.
- Mathisen O.A., Baade R.T., Lopp R.J. Breeding habits, growth and stomach contents of the Steller sea lion in Alaska // *J. Mammal.* 1962. V. 43. No. 4. P. 469–477. doi: 10.2307/1376909
- Thorsteinson F.V., Lensink C.J. Biological observations of Steller sea lions taken during an experimental harvest // *J. Wildl. Manage.* 1962. V. 26. No. 4. P. 353–359. doi: 10.2307/3798011
- Panina G.K. On the diet of Steller sea lions and seals in the Kuril Islands // *Izvestiya TINRO.* 1966. V. 58. P. 235–236 (in Russian).
- Perlov A.S. Feeding of Steller sea lions in the Kuril Islands // *Ekologiya.* 1975. No. 4. P. 106–108 (in Russian).
- Sinclair E.H., Zeppelin T.K. Seasonal and spatial differences in diet in the western stock of Steller sea lions (*Eumetopias jubatus*) // *J. Mammal.* 2002. V. 83. No. 4. P. 973–990. doi: 10.1644/1545-1542(2002)083<0973:SASDID>2.0.CO;2
- Waite J.N., Burkanov V.N. Steller sea lion feeding habits in the Russian Far East, 2000–2003 // *Sea lions of the world* / Eds. A.W. Trites, S.K. Atkinson, D.P. DeMaster, L.W. Fritz, T.S. Gelatt, L.D. Rea, K.M. Wynne. Alaska Sea Grant College Program, Anchorage, 2006. P. 223–234. doi: 10.4027/SLW.2006.16
- Trites A.W., Joy R. Dietary analysis from fecal samples: how many scats are enough? // *J. Mammal.* 2005. V. 86. No. 4. P. 704–712. doi: 10.1644/1545-1542(2005)086[0704:DAFFSH]2.0.CO;2
- Usatov I.A., Burkanov V.N. Summer diet of Steller sea lion in the Russian Far East, 2004–2008 // *Biosfera.* 2021. V. 14. No. 1. P. 8–28 (in Russian). doi: 10.24855/biosfera.v14i1.646
- Usatov I.A., Burkanov V.N., Tokranov A.M. Steller sea lion feeding ecology in the vicinity of cape Kozlova rookery, Eastern Kamchatka // *Biosfera.* 2022. V. 14. No. 3. P. 200–212 (in Russian). doi: 10.24855/biosfera.v14i3.680
- Usatov I.A., Tokranov A.M., Trukhanova I.S., Burkanov V.N. Steller sea lion diet in the Eastern Kamchatka // *Trudy VNIRO.* 2021. V. 185. P. 57–67 (in Russian). doi: 10.36038/2307-3497-2021-185-57-67
- Angermueller C., Pärnamaa T., Parts L., Stegle O. Deep learning for computational biology // *Mol. Syst. Biol.* 2016. V. 12. No. 7. Article No. 878. doi: 10.15252/msb.20156651
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention.* Springer, Cham, 2015. P. 234–241. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Khryashchev V., Larionov R., Ostrovskaya A., Semenov A. Modification of U-Net neural network in the task of multichannel satellite images segmentation // *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).* Batumi, Georgia, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884452
- Falk T., Mai D., Bensch R., Çiçek Ö., Abdulkadir A., Marrakchi Y., Böhm A., Deubner J., Jäckel Z., Seiwald K., Dovzhenko A., Tietz O., Dal Bosco C., Walsh S., Saltukoglu D., Tay T.L., Prinz M., Palme K., Simons M., Diester I., Brox T., Ronneberger O. U-Net: deep learning for cell counting, detection, and morphometry // *Nat. Methods.* 2019. V. 16. No. 1. P. 67–70. doi: 10.1038/s41592-018-0261-2
- Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015).* San Diego, 2015. P. 1–14. doi: 10.48550/arXiv.1409.1556
- Iglovikov V., Mushinskiy S., Osin V. Satellite imagery feature detection using deep convolutional neural network: A kaggle competition [Internet resource] <https://arxiv.org/abs/1706.06169> (Accessed: 16.01.2024).
- Do N.T., Jung S.T., Yang H.J., Kim S.H. Multi-level Seg-Unet model with global and patch-based X-ray images for knee bone tumor detection // *Diagnostics (Basel).* 2021. V. 11. No. 4. Article No. 691. doi: 10.3390/diagnostics11040691
- Li R., Liu W., Yang L., Sun S., Hu W., Zhang F., Li W. DeepUNet: A deep fully convolutional network for pixel-level sea-land segmentation // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2018. V. 11. No. 11. P. 3954–3962. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2833382
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Commun. ACM.* 2017. V. 60. No. 6. P. 84–90. doi: 10.1145/3065386
- Chollet F., Allaire J.J. *Deep Learning with R.* New York: Manning Publications Co. LLC, 2018. 416 p.
- Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms. 2017 [Internet resource] <https://arxiv.org/abs/1609.04747> (Accessed: 16.01.2024).
- Shorten C., Khoshgoftaar T.M. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // *J. Big Data.* 2019. V. 6. No. 1. Article No. 60. doi: 10.1186/s40537-019-0197-0

Оценка состояния водных экосистем с применением нового интегрального индекса возраста

© 2025. И. В. Гермашев¹, д. т. н., профессор, Е. В. Дербишер², к. т. н., доцент,
А. И. Новокщёнова³, к. с.-х. н., доцент, В. Е. Дербишер², д. х. н., профессор,

¹Волгоградский государственный университет,
400062, Россия, г. Волгоград, Университетский пр., д. 100,
²Волгоградский государственный технический университет,
400131, Россия, г. Волгоград, пр. В.И. Ленина, д. 28,
³Волгоградский государственный аграрный университет,
400002, Россия, г. Волгоград, Университетский просп., д. 26,
e-mail: derbisher1@yandex.ru

С помощью интегрального экологического показателя (индекса) водных биоценозов, вычисленного методами нечёткой математики, проанализировано состояние выборочных водоёмов природного парка Волго-Ахтубинской поймы Волгоградской области. В качестве исходных данных были взяты четырёхлетние наблюдения нескольких водоёмов. В результате анализа этих данных предложена нечёткая модель, позволяющая оценивать изменения возраста сукцессии на основании ряда показателей водных растений. Модель опирается на нечёткие числа, которые позволяют учесть неопределённости и неточности уже при проведении вычислений, и для полученных результатов, имея известный уровень неопределённости, проводить их адекватную интерпретацию. Оригинальность метода исследования заключается в определении возрастных характеристик фитоценозов водоёмов в нечётких условиях с применением индекса полного возраста сукцессии. Оценка качества воды служит основой информационного обеспечения мониторинга экологических изменений, происходящих в естественных и искусственных водных биоценозах для принятия мер, снижающих деградацию водоёмов. Предлагаемый интегральный метод определения возрастных стадий сукцессии водных биоценозов совместно с лабораторными и (или) полевыми исследованиями позволяет проводить количественный анализ экологических ситуаций, строить их математические модели, может служить расчётным элементом мониторинга изменения экологического состояния водных объектов. Предлагаемый интегральный подход имеет универсальный характер и может применяться для решения экологических задач, связанных с анализом результатов, выраженных нечёткими числами.

Ключевые слова: биоценоз, водоём, возрастная стадия сукцессии, качество воды, мониторинг, нечёткая модель.

Assessment of the aquatic ecosystem status using the new integral age index

© 2025. I. V. Germashev¹ ORCID: 0000-0001-5507-8508, E. V. Derbisher² ORCID: 0000-0002-3707-7189,
A. I. Novokshchyonova³ ORCID: 0000-0003-4141-3146, V. E. Derbisher² ORCID: 0000-0002-0521-5559

¹Volgograd state university,
100, Universitetsky Avenu, Volgograd, Russia, 400062,
²Volgograd state technical university,
28, V.I. Lenin Avenu, Volgograd, Russia, 400131,
³Volgograd state agricultural university,
26, Volgograd, Universitetsky Avenue, Russia, 400002,
e-mail: derbisher1@yandex.ru

Using an integral ecological indicator (index) of aquatic biocenoses calculated using fuzzy mathematics methods, the state of selected reservoirs in the Volga-Akhtuba floodplain Natural Park of the Volgograd region was analyzed. Four-year observations of several reservoirs were taken as initial data. As a result of these data analysis, a fuzzy model was proposed that allows estimating changes in the succession age based on a number of aquatic plants indicators. The model relies on fuzzy numbers, which make it possible to take into account uncertainties and inaccuracies already during calculations; and for the obtained results, having a known level of uncertainty, to carry out their adequate interpretation. The originality of the research method lies in determining the age characteristics of phytocenoses of water bodies in fuzzy

conditions using the index of the full succession age. Water quality assessment serves as the basis for information support for monitoring environmental changes occurring in natural and artificial aquatic biocenoses in order to take measures to reduce the degradation of water bodies. The proposed integral method for determining the age stages of succession of aquatic biocenoses, together with laboratory and (or) field studies, allows for a quantitative analysis of environmental situations, building mathematical models of them. The above method can be a computational element for monitoring changes in the ecological state of water bodies. The proposed integral approach has a universal character and can be used to solve environmental problems related to the analysis of results expressed in fuzzy numbers.

Keywords: biocenosis, reservoir, the age stage of succession, water quality, monitoring, fuzzy model.

Разработка и применение объективных показателей оценки состояния сообществ с целью прогнозирования состояния и оптимального управления процессами, позволяющими избежать критических ситуаций – насущная потребность времени. Существует много индексов экологической активности, позволяющих дать вероятностную оценку различных экосистем [1–4]. Отдельно укажем на индексы, связанные с исследованием малых водоёмов, так как именно эта область является предметом данной статьи. Отдельных индивидуальных (дифференциальных) индексов, используемых при изучении экосистем, довольно много [5, 6], например, при оценке индекса обхвата селекции в прудовом рыбоводстве [7], при оценке нормативов цветности воды [8], индекс сапробности [9, 10] и т. д. В зарубежной практике также активно используются экологические индексы оценки водных систем. Можно отдельно указать на работу-аналог [11], в которой описана оценка качества воды в бассейне реки Дунцзян (Китай) с помощью набора индексов оценки водных ресурсов, таких как: индекс биологических диатомовых водорослей – IBD, индекс трофических диатомовых водорослей – TDI, индекс Сладчека – SLA, индекс специфической чувствительности к загрязнению – IPS, общий индекс – IDG, индекс европейского экономического сообщества – COE. Сегодня в мировой практике дифференциальные критерийные подходы [12] к экологическим оценкам сменяются модифицированными гидрохимическими и гидробиологическими оценками состояния водных биоценозов, применяя их как комплексные [13, 14].

В данной работе на примере оценки состояния водоёмов Волго-Ахтубинской поймы Волгоградского региона мы предлагаем новый интегральный индекс, определяющий возрастную стадию сукцессии – ключевой характеристики случайной или поступательной динамики водоёма. Поскольку это имеет решающее значение для настоящей работы, напомним, что под возрастной стадией сукцессии в экологии понимают последовательную закономер-

ную смену одного биоценоза (в нашем случае водного) другим, на определённом участке среды во времени, в результате направленного изменения абиотического окружения [15]. Представляется, что выбор характеристики возрастной стадии сукцессии, когда произошли изменения исследуемого биоценоза, в том числе водного, является актуальным и надёжным способом отражения её временных и структурных изменений. Для обработки экспериментальных данных используем аппарат нечёткой математики [16–18].

Объекты и методы исследования

Рассмотрим предлагаемую стратегию на примере интегральной оценки динамики изменения состояния ряда озёр Волго-Ахтубинской поймы (на территории Волгоградской области). Живописная и богатая флорой и фауной Волго-Ахтубинская пойма начала стремительно вымирать и экологов всерьёз пугает будущее поймы. Выбор объектов исследования был не случайным, поскольку на рассматриваемой территории наблюдается прямая связь озёр с деятельностью природной системы в целом. Выбранные для исследования озёра и их водосбор представляют единый, многокомпонентный природный динамический объект.

Практическая часть исследований проводилась стандартными методами [19–21] в летний период 2015–2018 гг. на озёрах: Васино, Давыдкино, Кувшинковое, Кудаевское, Клеши, Раскатное. Укажем, что расчётные данные получены в нашем случае на основе оценки численности продуцентов (водных растений, произрастающих в исследуемых озёрах), как одного из показателей, характеризующих возрастную стадию сукцессии водоёма (Q_j). Полученные данные приведены в таблице 1. Выделим четыре качественные сериальные сукцессионные стадии развития каждого водоёма, включающие 4 серии на пути к современному его стабильному состоянию, рассматривая в совокупности динамику всех компонентов водного биоценоза. Построим интервальную

шкалу, в которой измеряется полная возрастная стадия сукцессии водоёма. Выделяем три функциональные группы водного сообщества: продуценты (низшие и высшие водные растения), консументы 1 порядка (простейшие, низшие ракообразные, личинки насекомых, черви, моллюски, растительноядные рыбы), консументы 2, 3 порядка (рыбы, водные позвоночные). По каждой функциональной группе выбираем набор параметров, характерных для выбранных водоёмов и измеряем показатели, доступные для исследования. Предварительно формализуем задачу в математических терминах, пригодных для использования методов нечёткой математики, опирающейся на алгебры нечётких чисел, преимущество которых состоит, во-первых, в том, что функция принадлежности нечёткого числа позволяет описать изменения неопределённости, характерные для данного значения, и использовать эту информацию для более адекватной интерпретации полученных результатов. Во-вторых, в возможности численно оценить абсолютное качество состояния и путём систематизации и соответствующей обработки информации сравнивать между собой объекты с неодинаковым набором свойств, описывающих систему, что особенно важно при принятии решений в условиях многофакторности, разнообразности, разнотипности данных и других видов неопределённости. Следует обратить внимание и на то, что многие параметры озёрных систем и процессов, происходящих в них, невозможно задать чёткими числовыми значениями, что вообще свойственно природной среде. Поэтому возникает необходимость в поисках концептуального подхода, обеспечивающего поддержку принятия решений в условиях дефицита информации.

Пусть для водоёма определено m показателей Q_1, \dots, Q_m , по которым производится вычисление возраста его сукцессии числом индексов оценки популяций. В данной работе для конкретизации метода рассмотрена подсистема водных растений. Экспертный анализ данных (табл. 1) показал, что некоторые из них изменяются случайно в зависимости от возраста водоёма. Сформирована подборка из чётких и нечётких данных, итоговая фактология представлена в таблице 1.

Результаты и обсуждение

Расчёт дифференциального индекса возраста озера осуществлялся в нечётких числах. Они в данном случае обозначены через I_A – не-

чёткий индекс возраста сукцессии водоёма, где $I_A: [0;1] [0;1]$. На шкале заданы значения I_A : a_y – нечёткое число, соответствующее первой серии сукцессии, a_m – второй, a_g – третьей, a_o – четвёртой, a_c – конкретному оцениваемому водоёму. Такой подход позволяет идентифицировать водоём по параметрам выбранной шкалы (на рисунке 1 это климаксовый (зрелый, устойчивый) водоём) и получить числовую, то есть количественную оценку. Чтобы найти значения $a_u(x)$, где $u \in \{y, m, g, o, c\}$, определены области значений Q_j , типичных для каждого из серий сукцессии водоёма: $Q_{yj}, Q_{mj}, Q_{gj}, Q_{oj}, Q_{cj}$, – первой, второй, третьей, четвёртой (которым условно присвоим категории соответственно молодой, зрелый, стареющий, старый водоём) и оцениваемого соответственно и проведено их математическое нормирование таким образом, чтобы перевести области значений каждого из параметров в отрезок $[0; 1]$, $j = 1, \dots, m$.

Критерии Q_{uj} переведены в нечёткие числа q_{uj} на универсуме $[0; 1]$ [14]:

$$\left. \begin{aligned} & q_{uj}(x) = e^{-\frac{(x-c_{uj})^2}{\sigma_{uj}^2}} x \in [0; 1]; u \in \{y, m, g, o, c\}; \\ & \sigma_{uj} = \frac{d_{uj}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & u \in \{y, m, g, o\}; c_{yj} = \frac{d_{yj}}{2}, c_{mj} = \frac{2d_{yj} + d_{mj}}{2}, \\ & c_{gj} = \frac{2d_{yj} + 2d_{mj} + d_{gj}}{2}, \\ & c_{oj} = \frac{2d_{yj} + 2d_{mj} + 2d_{gj} + d_{oj}}{2}, \\ & \sigma_{cj} = \frac{d_{c2j} - d_{c1j}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & \sigma_{cj} = \frac{d_{c2j} - d_{c1j}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & c_{cj} = \frac{d_{c2j} + d_{c1j}}{2}, \\ & d_{c1j} = \frac{|Q'_{0cj}|}{|Q'_j|}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где Q'_{0cj} – область значений параметра, меньших, чем в Q'_{cj} , т. е. $\forall x' \in Q'_{0cj}, x'' \in Q'_{cj}: x' < x''$. Следует также отметить, что для нормирования Q_{0cj} и Q_{cj} использованы те же процедуры, что и для Q_j , в результате чего получены Q'_{0cj} и Q'_{cj} .

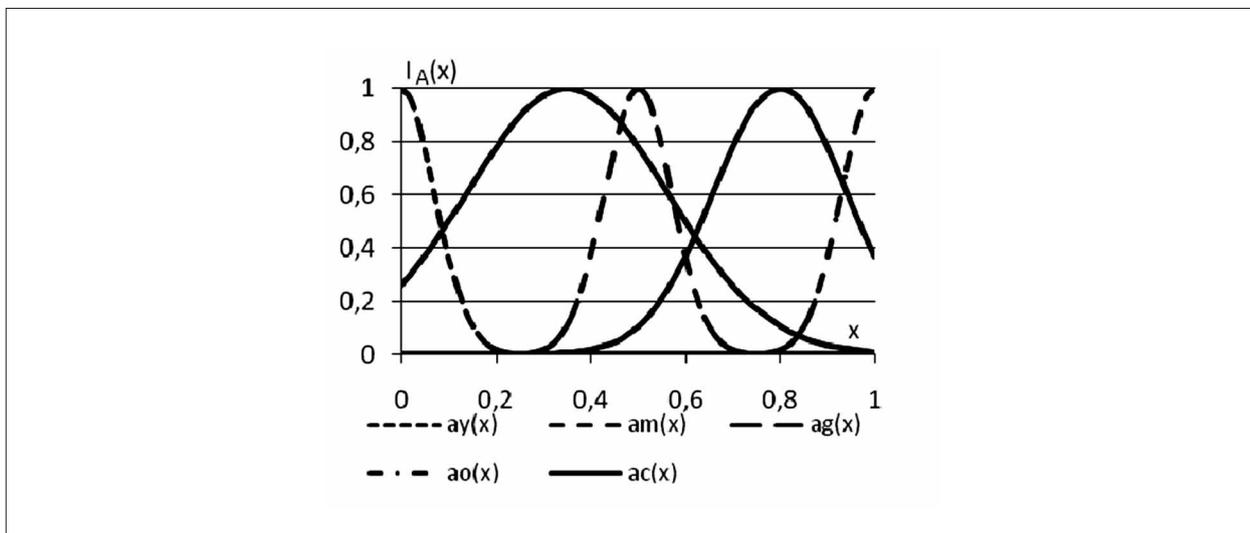


Рис. 1. Нечёткие значения индекса I_A для абстрактного водоёма
 Fig. 1. Fuzzy values of the I_A index for abstract water body

Поясним последовательность использования формул (1), реализующих математическую модель в вычислениях (рис. 1).

Группа формул (1) преодолевает следующие обычные методические сложности изначальной экологической задачи:

1) Масштабирование – приведение параметров к интервалу значений $[0; 1]$.

2) Относительность данных. Перевод абсолютных значений в относительные: d_{uj} показывает долю значений j -того параметра, соответствующих классу u , от суммарной по всем классам (y, m, g и o).

3) Безразмерность. Лишение размерности параметров играет ключевую роль в многокритериальном анализе рассматриваемой задачи, поскольку позволяет, используя функциональные группы водного биоценоза, вычислять интегральные показатели системы в целом.

4) Упорядочивание. Шкала I_A построена таким образом, что разбиение отрезка $[0; 1]$ осуществляется на четыре области, расположенные в порядке, соответствующем возрастному классу водоёма: y, m, g, o .

В свою очередь формулы (1) нормируют функции принадлежности так, чтобы величина $q_{uj}(x)$ была больше или равнялась 0,5 для всех значений x , соответствующих значениям Q_{uj} . При этом сами вычисления приводят к получению матрицы значений a_{uj} , $u \in \{y, m, g, o, c\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, которые показывают возрастную стадию сукцессии любого водного биоценоза по j -тому параметру, т. е. возраст для системы u , который отражает нечёткий вектор $\bar{a}_u = (q_{u1}, \dots, q_{um})$. Для свёртки вектора

\bar{a}_u в нечёткое число a_u использован известный во многих областях принцип взвешенного голосования [14], заключающийся в следующей формуле:

$$a_u = \sum_{j=1}^m \alpha_j q_{uj}, \quad (2)$$

где $u \in \{y, m, g, o\}$, $\alpha_j \in \mathbb{R}^+$ – уровень значимости j -того параметра, $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$.

Здесь также возникает некая проблема, которая состоит в том, что для отдельного параметра возрастные границы будут свои, и одинаковые значения I_A на самом деле будут отражать разные возрастные стадии сукцессии. Чтобы преодолеть проблему, мы провели голосование по величинам, показывающим, насколько отличается a_{cj} от граничных величин a_{uj} , $u \in \{y, m, g, o\}$:

$$a_c = \frac{1}{4} \sum_{u \in \{y, m, g, o\}} \left(a_u + \sum_{j=1}^{m_c} \alpha_{cj} (q_{cj} - q_{uj}) \right), \quad (3)$$

$$\alpha_{cj} = \frac{\alpha_j}{\sum_{k \in J_c} \alpha_k}, \quad (4)$$

где m_c – количество параметров для оцениваемого водоёма, $\alpha_{cj} \in \mathbb{R}$ – уровень значимости j -того параметра оценки водоёма, J_c – множество индексов параметров оценки водоёма, $m_c = |J_c|$.

Для расчёта индекса I_A возрастной стадии сукцессии, приведшей водоём к его настоящему стабильному состоянию, с помощью приведённой выше расчётной методики и математической модели, использовали данные,

Таблица 1 / Table 1

Экспериментальные данные, полученные по шести водоёмам Волго-Ахтубинской поймы
The experimental data obtained on six water bodies of the Volga-Akhtuba floodplain

Видовые названия продуцентов (Q _i) / Species names of producers (Q _i)	Название водоёма / Name of a water body					
	Давыдкино / Davidkino	Кудаевское / Kudaevskoe	Клешни / Kleshni	Кувшинковое / Kuvshinkovoe	Раскатное / Raskatnoe	Васино / Vasino
<i>Ceratophyllum demersum</i>	3,5	2,7	3,4	4,8	1,8	0
<i>Vallisneria spiralis</i>	1	2	0	0,6	0	0
<i>Najas major</i>	1,5	0,6	0	1,1	0,4	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0	0,1	0	0,3	–	0
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0,6	1	1,5	0,4	0,6	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0	0	0,7	0,1	0,1	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0	0,3	0,5	0,8	0	5
<i>Potamogeton pusillus</i>	0,4	0	0	–	0,1	0
<i>Nymphoides peltata</i>	0	0	0	–	0,7	0,5
<i>Polygonum amphibium</i>	0	0	0	–	0	0
Показатели, характеризующие возрастную стадию сукцессии водоёма (для водных растений) Indicators characterizing the age stage of the water body succession (for aquatic plants)						
Число видов погружённых и плавающих макрофитов / Number of submerged and floating makrophyte species	11	7	9	13	12	7
Число видов макрофитов с плавающими листьями (нейстофитов) / Number of macrophyte species with floating leaves (neustophytes)	3	0	3	3	2	4
Покрытие водного зеркала нейстофитами, % / Water surface covering with neustophytes, %	<1	0	<1	1	15	2
Число видов рдестов / Number of rdest species	3	2	4	4	3	1
Число видов харовых водорослей / Number of char algae species	1	0	1	1	3	0
Покрытие водного зеркала харовыми водорослями, % / Water surface covering with char algae, %	<1	0	<1	5	<1	0

Примечание: прочерк в таблице указывает на отсутствие экспериментальных данных для конкретного вида продуцентов.

Note: a dash in the table indicates no experimental data for a specific producer species.

представленные в таблице 1. Обработанные результаты приведены в таблице 2. Воспользовавшись процедурой взвешенного голосования (2)-(3) вычислены значения интегрального индекса I_A (графическая иллюстрация дана на рисунке 2).

В результате исследования озёра Волго-Ахтубинской поймы можно расположить по увеличению возраста сукцессии в следующий ряд: Кудаевское, Давыдкино, Кувшинковое, Раскатное, Клешни, Васино; все озёра принадлежат ко второй возрастной стадии сукцессии;

озеро Клешня старше водоёма Кудаевского на величину $e^{-\frac{(x-0,0931)^2}{0,7115^2}}$.

В качестве значения действительного индекса возраста I_A^R мы использовали аргумент максимального значения функции:

$$I_A^R = \arg \max_{[0;1]} I_A(x), \tag{5}$$

и получили действительные значения a_c^R, представленные в таблице 3. Индексы возраста a_c оцениваемых водоёмов даны на рисунке 2.

Таблица 2 / Table 2

Оценка выборочных водоёмов Волго-Ахтубинской поймы
Assessment of selective water bodies in the Volga-Akhtuba floodplain

Видовые названия продуцентов (водных растений), одного из показателей, характеризующих возрастную стадию сукцессии водоёма (Q_j) / Species names of producers (aquatic plants), one of the indicators characterizing age of succession of a water body (Q_j)	Уровень значимости α_j Significance value α_j	Серийная стадия сукцессии водоёма / Serial stage of water body succession			
		I	II	III	IV
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0,0303	0-1	0-2	0-3	0-5
<i>Vallisneria spiralis</i>	0,05051	0-3	0-1	0	0
<i>Najas major</i>	0,0303	0-2	0-3	0-2	0-1
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0,05051	0-1	0-1	0	0
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0,0303	0-1	0-3	0-2	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0,0303	0-1	0-3	0-2	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0,0404	0-1	0-1	1-3	3-5
<i>Potamogeton pusillus</i>	0,0303	0-1	0-1	0-2	0
<i>Nymphoides peltata</i>	0,05051	0	0	0-2	0-5
<i>Polygonum amphibium</i>	0,05051	0	0	0-1	0-2
Число видов погружённых и плавающих макрофитов Number of submerged and floating makrophyte species	0,05051	3-6	5-8	10-17	1-5
Число видов макрофитов с плавающими листьями (нейстофитов) / Number of macrophyte species with floating leaves (neustophytes)	0,0404	0	1-2	2-3	1-5
Покрытие водного зеркала нейстофитами, % Water surface covering with neustophytes, %	0,0303	0	0-5	0-10	0-50
Число видов рдестов / Number of rdest species	0,05051	0-2	1-3	3-7	0-2
Число видов харовых водорослей Number of char algae species	0,05051	0	0-1	0-5	0
Покрытие водного зеркала харовыми водорослями, % Water surface covering with char algae, %	0,05051	0	<1	0-50	0

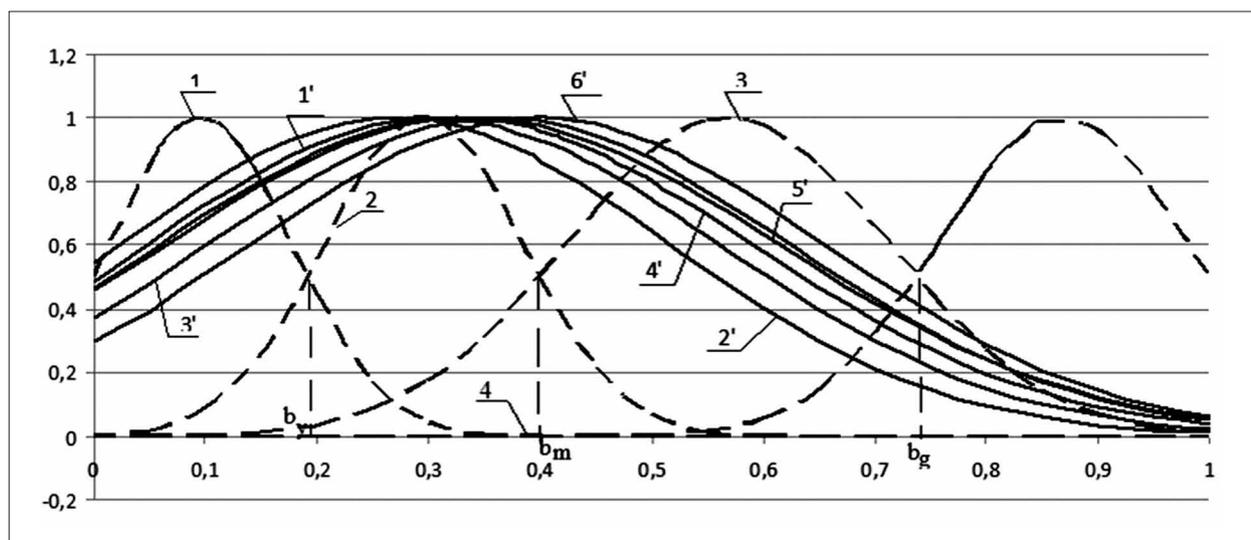


Рис. 2 Графическая иллюстрация результатов вычисления индекса $I_A(x)$
1 – молодой, 2 – зрелый, 3 – стареющий, 4 – старый; 1' – Давыдкино, 2' – Кудавское, 3' – Клешни, 4' – Кувшинковое, 5' – Раскатное, 6' – Васино
Fig. 2 Graphic illustration of $I_A(x)$ index calculation results
1 – young, 2 – mature, 3 – senile, 4 – old; 1' – Davidkino, 2' – Kudaevskoe, 3' – Kleshni, 4' – Kuvshinkovoe, 5' – Raskatnoe, 6' – Vasino

Таблица 3 / Table 3

Результаты количественной классификации возраста водоёмов Волго-Ахтубинской поймы
Results of quantitative age classification of water bodies in the Volga-Akhtuba floodplain

Название водоёма Name of water body	Действительный индекс возраста a_c^R Valid index of age a_c^R
Молодые водоёмы (I сериальная стадия) / Young water body (serial stage I)	
Не выявлено / Not revealed	
Зрелые водоёмы (II сериальная стадия), $b_y=0,1921$ Mature water body (serial stage II), $b_y=0.1921$	
Кудаевское / Kudaevskoe	0,2702
Давыдкино / Davidkino	0,3043
Кувшинковое / Kuvsinkovoe	0,3249
Раскатное / Raskatnoe	0,3391
Клешни / Kleshni	0,3633
Васино / Vasino	0,3976
Стареющие водоёмы (III сериальная стадия), $b_m=0,3999$ Senile water body (serial stage III), $b_m=0.3999$	
Не выявлено / Not revealed	
Старые водоёмы (IV сериальная стадия), $b_g=0,7375$ Old water body (serial stage IV), $b_g=0.7375$	
Не выявлено / Not revealed	

Далее вычислены граничные значения b_u ($u \in \{y, m, g\}$) для классов: b_y – между молодыми и зрелыми, b_m – между зрелыми и стареющими, b_g – между стареющими и старыми, – как точки пересечения соответствующих функций принадлежности, т. е. удовлетворяющих следующим равенствам (табл. 3): $a_y(b_y)=a_m(b_y)$, $a_m(b_m)=a_g(b_m)$, $a_g(b_g)=a_o(b_g)$. Окончательную возрастную классификацию водоёмов проводили по значениям I_A^R . При этом считаем водоём молодым, если $a_c^R < b_y$, зрелым, если $b_y \leq a_c^R < b_m$, стареющим, если $b_m \leq a_c^R < b_g$, старым, если $b_g \leq a_c^R$. Итоговые результаты классификации в количественных интегральных оценках представлены в таблице 3.

Заключение

Предлагаемый интегральный метод определения возрастных стадий сукцессии водных биоценозов может служить расчётным элементом мониторинга изменения экологического состояния водных объектов. Предложенный индекс носит универсальный характер и может быть использован для оценки разнообразных биоценозов, оцениваемых по многим параметрам, путём определения типичных значений каждой системы в заданном ареале с последующей математической обработкой экспериментальных данных.

Предлагаемая методика расчёта совместно с лабораторными и (или) полевыми исследованиями позволяет проводить количественный анализ экологических ситуаций, строить их математические модели, которые, по сути и природе объектов, являются нечёткими и поэтому требуют применения методов нечёткой математики, как это показано в настоящей статье.

Работа выполнена в рамках реализации проекта 12фцп-Н5-06 «Разработка показателей и критериев оценки состояния водных и околоводных экосистем и возможных норм допустимой нагрузки на водный режим по экологическим показателям» Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах», а в части разработки и применения математических моделей и методов, в частности нечёткой математики, моделирования и идентификации сложных систем, поддержана совместным грантом РФФИ и правительства Волгоградской области (грант № 18-48-340011).

Литература

1. Тикунов В.С., Белоусов С.К. Интегральная характеристика качества атмосферного воздуха городов Европы // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 47–55. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-047-055

2. Лукин С.В. Динамика агроэкологического состояния почв Белгородской области при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1671–1685. doi: 10.31857/S0032180X23600890
3. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Определение трофического статуса водоёма и пространственного распределения водной растительности по интегральным показателям // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 42–46. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-042-046
4. Дербишер Е.В., Погорелов П.И., Гермашев И.В., Дербишер В.Е. Априорное ранжирование факторов при расчёте индекса экологической опасности веществ с использованием нечётких множеств // Химическая промышленность сегодня. 2006. № 8. С. 48–56.
5. Гермашев И.В., Дербишер В.Е., Дербишер Е.В., Маркушевская Е.А. Анализ нечётких данных для оптимизации химико-технологических систем // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 3. С. 153–160.
6. Гермашев И.В., Дербишер Е.В., Дербишер В.Е. Вычисление арифметических операций над нечёткими числами для анализа сложных систем // Математические методы в технике и технологиях. 2016. № 2(84). С. 63–65.
7. Хабжоков А.Б., Казанчев С.Ч., Исмаилов А.А. Экологическое значение индекса обхвата в селекции карпа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (160). С. 124–129.
8. Ялалетдинова А.В., Малкова М.А., Еникеева Л.В., Кантор Е.А. О возможности использования эмпирической функции распределения для количественной оценки вероятности превышения нормативов по цветности // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 73–82. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-073-082
9. Масюткина Е.А. Оценка экологического состояния оз. Виштынецкого с применением различных гидробиологических индексов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2014. № 7. С. 66–76.
10. Гриб Й.В., Шандрук О.М. Використання екологічних індексів та просторових біомаркерів у ставковому рибництві // Рибогосподарська наука України. 2009. № 3 (9). С. 78–84.
11. Deng P., Lei Y., Liu W., Wang X. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin // Acta Ecologica Sinica. 2012. V. 32. No. 16. P. 5014–5024. doi: 10.5846/stxb201112071867
12. Pasquaud S., Courrat A., Fonseca V.F., Gamito R., Gonçalves C.I., Lobry J., Lepage M., Costa M.J., Cabral H. Strength and time lag of relationships between human pressures and fish-based metrics used to assess ecological quality of estuarine systems // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2013. V. 134. P. 119–127.
13. Домбровский К.О., Крупей К.С. Экологическая оценка малых рек г. Запорожья с помощью интегрального индекса экологического состояния // Вестник Международной академии наук (Русская секция). 2011. № 2. С. 220.
14. Rylsky O.F., Dombrovskiy K., Masikeyvych Yu., Masikeyvych A., Malovanyu M. Evaluation of water quality of the Siret river by zooperiphyton organisms // Journal of Ecological Engineering. 2023. V. 24. No. 6. P. 294–302. doi: 10.12911/22998993/163166
15. Абдюкова Э.А., Кулагин Г.С., Рашитова Г.М., Абдюкова А.Ю. Экологическая оценка воздействия агропромышленного комплекса на состояние малых рек Башкортостана // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 73 (09). С. 24–35.
16. Гермашев И.В., Дербишер В.Е., Лосев А.Г. Анализ и идентификация сложных систем в естественных науках. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2018. 272 с.
17. Хоружая Т.А. Оценка экологической опасности. М.: Книжный сервис, 2002. 208 с.
18. Гермашев И.В., Дербишер Е.В., Дербишер В.Е., Карташова А.В., Титов А.В. Алгебра нечётких чисел с унимодальной функцией принадлежности // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9. № 4. С. 590–601. doi: 10.21638/spbu01.2022.402
19. Методика экологической оценки качества поверхностных вод по соответствующим категориям // Сборник нормативно-методических документов по организации и осуществлению мониторинга поверхностных вод. Харьков: ИД «ИНЖЕК», 2007. 38 с.
20. Правила охраны поверхностных вод (типовые положения). М.: Госкомприроды СССР, 1991. 34 с.
21. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Бражникова Л.В., Жулидов А.В. Мониторинг качества вод: оценка токсичности. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 159 с.

References

1. Tikunov V.S., Belousov S.K. Integral characteristic of air quality of European cities // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 47–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-047-055
2. Lukin S.V. Dynamics of the agroecological state of the soils of the central chernozem region during long-term agricultural use (on the example of the Belgorod Region) // Pochvovedenie. 2023. No. 12. P. 1671–1685 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X23600890
3. Kutjavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Determination of the trophic status of the water reservoir and spatial distribution of aquatic vegetation by integral indicators // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 42–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-042-046
4. Derbisher E.V., Pogorelov P.I., Germashev I.V., Derbisher V.E. A priori ranking of factors in calculating the environmental hazard index of substances using fuzzy sets // Chemical Industry Developments. 2006. No. 8. P. 48–56 (in Russian).
5. Germashev I.V., Derbisher V.E., Derbisher E.V., Markushevskaya E.A. The fuzzy data analysis for the chem-

- ical-technological systems optimization // Information technologies. 2018. V. 24. No. 3. P. 153–160 (in Russian).
6. Germashev I.V., Derbisher E.V., Derbisher V.E. Calculating arithmetic operations on fuzzy numbers for analyzing complex systems // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2016. No. 2 (84). P. 63–65 (in Russian).
7. Khabzhokov A.B., Kazanchev S.Ch., Ismailov A.A. Ecological significance of body girth index in carp breeding // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2018. No. 2 (160). P. 124–129 (in Russian).
8. Yalaletdinova A.V., Malkova M.A., Enikeeva L.V., Kantor E.A. On the possibility of using an empirical distribution function to quantify the probability of exceeding the water color standards // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 4. P. 73–82 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-073-082
9. Masyutkina E.A. An assessment of the ecological condition of Lake Vištytis using various hydrobiological indices // *IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences*. 2014. No. 7. P. 66–76 (in Russian).
10. Grib I.V., Shandruck O.M. The use of ecological indexes and spatial biomarkers in pond fish-farming // *Ribogospodarska nauka Ukraïni*. 2009. No. 3 (9). P. 78–84 (in Ukrainian).
11. Deng P., Lei Y., Liu W., Wang X. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin // *Acta Ecologica Sinica*. 2012. V. 32. No. 16. P. 5014–5024 (in Chinese). doi: 10.5846/stbx201112071867
12. Pasquaud S., Courrat A., Fonseca V.F., Gamito R., Gonçalves C.I., Lobry J., Lepage M., Costa M.J., Cabral H. Strength and time lag of relationships between human pressures and fish-based metrics used to assess ecological quality of estuarine systems // *Estuar. Coast. Shelf Sci*. 2013. V. 134. P. 119–127. doi: 10.1016/j.ecss.2013/02/002
13. Dombrovsky K.O., Krupey K.S. Ecological assessment of Zaporozhye small rivers by integral index of ecological condition // *Herald of the International Academy of Science. Russian Section*. 2011. No. 2. P. 220 (in Russian).
14. Rylsky O., Dombrovskiy K., Masikevych Yu., Masikevych A., Malovanyy M. Evaluation of water quality of the Siret river by zooperiphyton organisms // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. V. 24. No. 6. P. 294–302. doi: 10.12911/22998993/163166
15. Abdyukova E.A., Kulagin G.S., Rashitova G.M., Abdyukova A.Yu. Ecological estimation of agricultural complex influence on the condition of small rivers of Bashkortostan // *Scientific journal of KubSAU*. 2011. No. 73 (09). P. 24–35 (in Russian).
16. Germashev I.V., Derbisher V.E., Losev A.G. Analysis and identification of complex systems in the natural sciences. Volgograd: Publishing House of Volgograd State University, 2018. 272 p. (in Russian).
17. Khoruzhaya T.A. Environmental hazard assessment. Moskva: Knizhnyy servis, 2002. 208 p. (in Russian).
18. Germashev I.V., Derbisher E.V., Derbisher V.E., Kartashova A.V., Titov A.V. Algebra of fuzzy numbers with unimodal membership function // *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2022. V. 9. No. 4. P. 590–601 (in Russian). doi: 10.21638/spbu01.2022.402
19. Methodology of environmental assessment of surface water quality in the relevant categories // *Collection of normative and methodological documents on the organization and implementation of surface water monitoring*. Kharkiv: ID “INZhEK”, 2007. 38 p. (in Russian).
20. Rules for the protection of surface waters (standard provisions). Moskva: Goskompirody SSSR, 1991. 34 p. (in Russian).
21. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Brazhnikova L.V., Zhulidov A.V. Monitoring of water quality: assessment of toxicity. Sankt-Peterburg: Hydrometeoizdat, 2000. 159 p. (in Russian).

Кахакамид А – ингибитор ДНК-гиразы, выделенный из нового штамма продуцента *Nocardiosis dassonvillei* Т68

© 2025. Ю. А. Буюклян¹, м. н. с., Ю. В. Закалюкина^{1,2}, к. б. н., с. н. с.,
А. Р. Белик¹, м. н. с., В. А. Алферова^{2,3}, к. х. н., с. н. с.,

И. А. Остерман^{1,4}, д. х. н., в. н. с., М. В. Бирюков^{1,2}, к. б. н., с. н. с.,
¹Научно-технологический университет «Сириус»,

354340, Россия, г. Сочи, ул. Олимпийский проспект, д. 1,

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119234, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,

³Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова,
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16,

⁴Сколковский институт науки и технологий,
121205, Россия, г. Москва, ул. Большой бульвар, д. 30,

e-mail: metrim@gmail.com

В ходе поиска штаммов продуцентов перспективных субстанций для противомикробной терапии с помощью репортёрной системы pDualrep2 был идентифицирован штамм *Nocardiosis dassonvillei* Т68, выделенный из почвы на табачном поле в станции Раздольная Краснодарского края. Продуцируемый метаболит штамма Т68 вызывает подавление роста *Escherichia coli* с делецией гена *tolC* и индукцию SOS-ответа в бактериальных клетках. Выделенная и очищенная активная субстанция была идентифицирована с помощью HPLC-ESI-qToF как кахакамид А. Ранее механизм действия кахакамида А через ингибирование синтеза ДНК описан не был, также мы впервые обнаружили активность данного вещества против штаммов *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603, *K. pneumoniae* ATCC 62867, *E. coli* ATCC 35705, обладающих клинически значимой резистентностью к бета-лактамам, что делает данное вещество и мишень его действия перспективными для разработки терапевтических препаратов. Детальное исследование биосинтеза кахакамида А станет предметом дальнейших исследований.

Ключевые слова: поиск антибиотиков, кахакамид А, актиномицеты, штамм *Nocardiosis dassonvillei* Т68.

Kahakamide A isolated from *Nocardiosis dassonvillei* Tb8 novel strain is a DNA gyrase inhibitor

© 2025. J. A. Buyuklyan¹ ORCID: 0009-0008-2698-8391, Yu. V. Zakalyukina^{1,2} ORCID: 0000-0001-8943-5761,
A. R. Belik¹ ORCID: 0000-0003-1872-0324, V. A. Alferova^{2,3} ORCID: 0000-0002-8961-5890,
I. A. Osterman^{1,4} ORCID: 0000-0001-7748-980X, M. V. Biryukov^{1,2} ORCID: 0000-0002-5765-1221,
¹Sirius University of Science and Technology,
1, Olympic Avenue St., Sochi, Russia, 354340,
²Moscow State University named after M.V. Lomonosova,
1, Leninskie Gory St., Moscow, Russia, 119234,
³Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry
of the Russian Academy of Sciences,
16, Miklouho-Maclay St., Moscow, Russia, 117997,
⁴Skolkovo Institute of Science and Technology,
30, Bolshoy Boulevard St., Moscow, Russia, 121205,
e-mail: metrim@gmail.com

The search for new biologically active substances as well as the study of the mechanisms of action of previously described antimicrobial metabolites, still remain priority areas of fundamental chemical and biological research, since the results of such work can help in overcoming the growing antibiotic resistance of pathogenic microorganisms. Modern approaches to search for bioactive compounds using high-throughput screening methods make it possible to discover and study new compounds with high speed and accuracy. An example of such a system is a genetically modified *Escherichia*

coli strain containing the plasmid vector pDualrep2. This genetic construction allows the detection of the antibacterial activity of compounds and the mechanism of action of a specific metabolite. During the search for strains producing promising substances for antimicrobial therapy using the pDualrep2 reporter system, *Nocardioopsis dassonvillei* strain Tb8, isolated from soil in a tobacco field (Razdolnaya village, Krasnodar Krai) was identified. The produced metabolite of strain Tb8 causes growth suppression of *E. coli* with *tolC* gene deletion and induction of SOS-response in bacterial cells. The isolated and purified active substance was identified by HPLC-ESI-qTof as Kahakamide A. The mechanism of action of Kahakamide A through inhibition of DNA synthesis has not been previously described, and for the first time we found the activity of this substance against *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603, *K. pneumoniae* ATCC 62867, *E. coli* ATCC 35705 strains with clinically significant resistance to beta-lactams. The above makes this substance and the target of its action promising for the development of therapeutic drugs. A detailed study of Kahakamide A biosynthesis will be the subject of further research.

Keywords: search for antibiotics, kahakamide A, actinomycetes, strain *Nocardioopsis dassonvillei* Tb8.

«Золотая эра антибиотиков», приходящаяся на середину XX века, ознаменованная открытием большого числа природных веществ с антимикробным действием, сменилась эпохой антибиотикорезистентности патогенных бактерий [1–3]. Распространение множественной лекарственной устойчивости среди микроорганизмов и превращение их в суперпатогены – одна из наиболее актуальных проблем для здравоохранения в мировом масштабе, поскольку потенциал введённых в клиническую практику веществ почти исчерпан, а тенденция открытия новых соединений снижается [4–6]. Использование традиционных методов выделения бактерий-антагонистов из почвы в настоящее время уже малоэффективно, так как зачастую приводит к перекрытию ранее идентифицированных молекул. В связи с этим крайне важно развить подходы, позволяющие на ранних этапах поиска устанавливать мишени действия активных веществ, как с целью обнаружения новых активных метаболитов, так и для раскрытия потенциала ранее идентифицированных молекул, что будет способствовать дальнейшему практическому применению их в терапевтической практике [7–9].

Примером подобного подхода выступает мишень-ориентированный скрининг, нацеленный на поиск антибактериальных молекул, таргетно действующих на процессы реализации генетической информации у бактерий: репликацию, транскрипцию и трансляцию. На сегодняшний день свою эффективность показала репортёрная система pDualrep2, направленная на детекцию молекул, вызывающих в клетках активацию SOS-ответа и нарушения биосинтеза белка посредством экспрессии генов флуоресцентных белков [10].

Наиболее популярным источником природных биологически активных веществ выступают представители филума Actinomycetota, которые являются продуцентами около 50% используемых в медицинской

практике антибактериальных соединений [11–13]. Актиномицеты – грамположительные прокариоты с высоким содержанием GC-пар в ДНК [14, 15], для которых характерны геномы большого размера 5–10 млн пар оснований с обилием генов вторичного метаболизма [16–18]. Хотя с середины XX века открыты более тысячи соединений, которые синтезируют актиномицеты [17], использование современных методов молекулярной биологии позволяет выявить у ранее исследованных молекул новые и уникальные свойства.

Успешным примером такого подхода может служить тетраценомицин X, механизм действия которого был выявлен с помощью репортёрной системы pDualrep2 [19]. Антибактериальные свойства для данной молекулы были впервые описаны в 60-х гг. XX века, а предположения о механизме действия основывались только на её структурном сходстве с молекулой доксорубина, ингибирующего процесс репликации ДНК. Однако, использование репортёрного штамма в экспериментах по оценке активности тетраценомицина X явно указало на нарушение синтеза белка в клетках, что в последствии было подтверждено с помощью крио-электронной микроскопии – был описан необычный сайт связывания антибиотика с большой субъединицей рибосомы.

В настоящей работе с помощью репортёрной системы впервые показан механизм действия кахакамида A (kahakamide A), вещества, продуцируемого штаммом *Nocardioopsis dassonvillei* Tb8, выделенного нами из почвы под посадками табака обыкновенного. Ранее данный индольный нуклеозид был получен из штамма того же вида, выделенного из донных осадков у острова Кауаи, Гавайи (Kauai, Hawaii) и была показана его антибактериальная активность в отношении *Bacillus subtilis* [20], однако механизм действия вещества не был установлен. Также обнаружено, что кахакаמיד A проявляет активность против ряда клинически значимых бактериальных пато-

генов, имеющих устойчивость к широкому спектру бета-лактамаз: *Klebsiella pneumoniae* ATCC 700603 *ESBL(SHV-18)R*, *K. pneumoniae* ATCC 62867 *blaOXA-48R*, *E. coli* ATCC 35705 *blaVIM-4R*, что может быть перспективным для его практического использования.

Объекты и методы исследования

Отбор образцов, выделение и культивирование микроорганизмов. Штамм Т68 был выделен из верхнего горизонта почвы, отобранной на плантации табака обыкновенного (*Nicotiana tabacum* L.) в станице Раздольная Краснодарского края (45°23'24,1" с. ш., 39°32'41,3" в. д.). Пробоотбор производился согласно методике, описанной ранее [21]: образец верхнего слоя почвы (0–5 см) был снят стерильным шпателем и помещён в стерильную ёмкость для сбора образцов. Актинобактерии выделяли путём поверхностного посева на агаризованные питательные среды из 10-кратных разведений почвенных суспензий [22]. В качестве питательной среды использовали овсяный агар (ISP3) с добавлением нистатина и налидиксовой кислоты в конечной концентрации 250 мкг/мл и 10 мкг/мл соответственно для подавления развития микромицетов и грамтрицательных бактерий. Посев инкубировали 14 суток при 28 °С.

Штамм Т68 выделили в чистую культуру из первичного посева наряду с другими мицелиальными актинобактериями на основе морфологических признаков и поддерживали в лабораторных условиях на овсяном агаре и органическом агаре 79 [23]. Для долговременного хранения при -80 °С штамм культивировали в жидкой среде ISP3 в течение 2–3 суток с постоянным перемешиванием 200 об./мин при 28 °С, а затем полученную суспензию смешивали с равным объёмом 50% раствора глицерина и замораживали в жидком азоте.

Полифазно-таксономическая идентификация штамма. Культуральные признаки штамма Т68 (наличие и окраску воздушного и субстратного мицелия, выделение растворимых пигментов) оценивали на плотных средах, рекомендованных International Streptomyces Project (ISP), после 14 сут культивирования при 28 °С [24].

Морфологические признаки (наличие и форму цепочек репродуктивных спор, характер поверхности спор) оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6380LA (JEOL Ltd., Акишима, Токио,

Япония) спустя 4 сут роста при 28 °С на среде органический агар 79.

Утилизацию источников углерода (моно- и олигосахаридов, спиртов) оценивали с помощью бумажных дисков (HiMediaLab, Индия), разложенных на минеральном агаре ISP 9 с добавлением 0,04% бромкрезолового пурпурного в качестве рН-индикатора при 28 °С в течение 14 дней [24]. В случае утилизации исследуемого углевода образуется соответствующая органическая кислота, и среда изменяет окраску с фиолетового на светло-жёлтый цвет ввиду понижения рН среды. Способность разлагать крахмал, целлюлозу и казеин оценивали согласно ранее описанной методике по размеру зон гидролиза полимеров [24].

Чувствительность к различным антибиотикам определяли с помощью бумажных дисков с заданной концентрацией активного вещества (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd, Индия). Моноспоровую суспензию штамма Т68 распределяли шпателем по агаризованной среде ISP3, подсушивали, раскладывали диски с антибиотиками и инкубировали в течение 7 сут при 28 °С.

Полногеномное секвенирование, филогенетический анализ и анализ биосинтетических генных кластеров (БГК). Геномная ДНК штамма-продуцента Т68 была выделена согласно методике [25]. Геном штамма Т68 был секвенирован *de novo* с использованием платформы Illumina HiSeq 4000 (Illumina, Сан-Диего, Калифорния, США).

Сборка генома была осуществлена с помощью St. Petersburg genome assembler (SPAdes) v3.13.0 [26]. Геном был аннотирован с использованием алгоритма PROKKA версии 1.14.5 [27], идентификация БГК антибиотиков осуществлялась с применением программы The antibiotics and secondary metabolites analysis shell (antiSMASH 7.0) [28].

Филогенетическую принадлежность исследовали по полногеномной последовательности с использованием сервиса Type (Strain) Genome Server (TYGS) [29]. Геном штамма автоматически сопоставлялся со всеми геномами, представленными в базе данных TYGS, с помощью алгоритма MASH [30]. Филогенетическое дерево было получено с помощью FastME 2.1.6.1 на основании расстояний GBDP, рассчитанных, исходя из нуклеотидных последовательностей генома. Длины ветвей были масштабированы по формуле расстояния GBDP d5 [31].

Исследование антимикробного действия. Детекцию антибактериальной активности осу-

щественности на штаммах *E. coli* JW5503 $\Delta tolC$, характеризующем делецией гена $\Delta tolC$, и *E. coli* BW25113 *lptD*, имеющем делецию в гене *lptD* с 330 по 352. Такая точечная мутация приводит к нарушению синтеза липополисахаридной оболочки грамотрицательных бактерий, тем самым повышает проницаемость для низкомолекулярных соединений [10].

Наличие точечных мутаций в геноме тест-штаммов обуславливает ослабление механизмов защиты и увеличивает чувствительность к антибактериальным веществам, что в свою очередь повышает вероятность обнаружения нового метаболита. Данные штаммы содержат плазмиду pDualrep2 [10], несущую гены флуоресцентных белков TurboRFP или Katushka2S, экспрессия которых индуцируется веществами, вызывающими в сублетальных концентрациях ингибирование репликации ДНК или трансляции, соответственно.

Для проведения скрининга на репортёрных штаммах использовали метод диффузии в агаре описанный ранее [32, 33]. Штамм T68 культивировали на среде ISP3, тестирование проводили на 6, 9 и 12 сут, для этого из участка газона с отчётливым ростом вырезали несколько агаровых блоков диаметром 5 мм и помещали их на чашки, содержащие агаризованную LB среду [22], предварительно засеянную культурой определённого тест-организма. Флуоресцентный сигнал детектировали на следующий день с помощью гель-документирующей системы ChemiDoc MP (Bio-Rad) в предустановленных каналах Cy-3 и Cy-5.

Для более расширенного определения спектра антимикробного действия, штамм T68 тестировали на коллекционных штаммах и мультирезистентных клинических изолятах, таких как *Staphylococcus aureus* ATCC 29213, *S. aureus* ATCC 25923, *S. aureus* SS01, *S. aureus* (MRSA) INA00761, *Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Candida albicans* CBS 8836, *Mycobacterium smegmatis* Ac-1171, *K. pneumoniae* 59659, *K. pneumoniae* 62867, *K. pneumoniae* 67704, *K. pneumoniae* 86561, *K. pneumoniae* 88252, *K. pneumoniae* 101073, *K. pneumoniae* 105142, *K. pneumoniae* ATCC 700603, *Escherichia coli* 61955, *E. coli* 35705, *E. coli* ATCC 25922, *E. coli* ATCC 35218, *Acinetobacter baumannii* 95776, *A. baumannii* 92829, *A. baumannii* 105129, *A. baumannii* 100322, *Enterococcus faecium* 99306, *Pseudomonas aeruginosa* 80858, *P. aeruginosa* 79952, *P. aeruginosa* 105295, *P. aeruginosa* 111226, *P. aeruginosa* ATCC 27853. Для бактерий использовали агаризованную среду LB,

а для дрожжей – глюкозо-пептонно-дрожжевой агар [34], затем инкубировали при 37 °C 24 ч, после чего оценивали размер зон подавления роста.

Выделение и идентификация активного вещества. В качестве оптимальной среды для наработки целевого метаболита использовали жидкую среду ISP3, на которой культивировали штамм T68 в течение 7 сут при 28 °C в условиях непрерывного перемешивания на орбитальном шейкере New Brunswick Innova (Eppendorf) при 200 об./мин. Далее с помощью центрифугирования при 4000g отделяли культуральную жидкость (КЖ) от биомассы. Полученную КЖ концентрировали и очищали с помощью твёрдофазной экстракции (ТФЭ), используя хроматографическую колонку Poly-Prep Econo-Pac (Bio-Rad), содержащую 1 мл сорбента LPS-500H (Техносорбент, Россия). После этого производили элюцию в ступенчатом градиенте вода-ацетонитрил с фракционным сбором элюата. Антагонистическая активность собранных фракций была исследована, и активная фракция была использована для дальнейшей ВЭЖХ очистки. ВЭЖХ-анализ и фракционирование выполняли с помощью системы Vanquish Flex с использованием детектора с диодной матрицей (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США), оснащённого колонкой Luna 5 мкм C18(2) 100 Å, 250×4,6 мм (Phenomenex, Торранс, Калифорния, США) скорость потока 1 мл/мин, инъекционный объём – 20 мкл. Для разделения образца использовали воду в качестве элюента А и ацетонитрил в качестве элюента В. Элюирование осуществлялось путём увеличения концентрации элюента В с 25% в течение 5 мин, с 25 до 50% за 1 мин, 50% в течение 4 мин, с 50 до 80% за 1 мин, 80% в течение 2 мин, с 80 до 95% за 1 мин, затем 95% элюента В 2 мин. Фракции собирали по 1 мл и анализировали на наличие антибактериальной активности. Время удерживания активного компонента составило 7,34 мин.

Активные фракции анализировали с использованием хромато-масс-спектрометрической системы на базе хроматографа UltiMate 3000 (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США), оснащённого колонкой Acclaim RSLC 120 C18 2,2 мкм 2,1×100 мм (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США) сопряжённой с qToF масс-спектрометром maXis II 4G ETD (Bruker Daltonics, Бремен, Германия) режим ионизации – электроспрей. Сбор данных осуществлялся в режиме полного сканирования от 100–1500 м/з, МС/МС

с выделением для фрагментации трёх наиболее интенсивных ионов, тип диссоциации: CID 10–40 эВ, ионизация молекул исследуемого вещества осуществляется в потоке инертного азота. Масс-спектры обрабатывали с помощью OpenChrom Lablicate Edition (1.4.0.202201211106), TOPPView v.2.6.0 [35]. Химические структуры были идентифицированы с использованием баз данных GNPS [36], NPAtlas [37, 38] и Dictionary of Natural Products 31.1. Активную ВЭЖХ-фракцию в количестве 1 мл концентрировали с помощью вакуумного биоконцентратора CentriVar Vacuum Concentration System (Labconco), растворяли в 50 мкл ДМСО и добавляли 450 мкл воды и именовали рабочий раствор антибиотика.

Результаты и обсуждение

Генетический и филогенетический анализ. Содержание G+C в геноме штамма Т68 составляет 72,66%, что соответствует содержанию G+C для родов, относимых к филуму Actinomycetota [39].

Сравнительный анализ гена 16S рРНК штамма Т68 (1533 п. н.) с аналогичными последовательностями, размещёнными в базе данных ГенБанк с применением алгоритма BLAST, показал, что штамм Т68 принадлежит к роду *Nocardiosis* и при полном перекрытии нуклеотидных последовательностей обнаруживает наибольшее сходство с *N. akabiae* NDS12^T (99,61%) и *N. dassonvillei* DSM 43111^T (99,54%). Однако, по данным сервиса LPSN, содержащего актуальный список имён прокариот [40], *N. akabiae* не считается опубликованным согласно принятым правилам и

включённым в официальную номенклатуру для бактерий и, таким образом, был исключён из дальнейшего анализа.

Степень родства штамма Т68 с его ближайшими филогенетическими соседями была определена с помощью сравнительного анализа полногеномных последовательностей типовых штаммов близкородственных видов, осуществлённого на веб-сайте tygs.dsmz.de (дата обращения 13.01.2024), а также путём определения средней нуклеотидной идентичности между сравниваемыми штаммами (ANI) с использованием алгоритма OrthoANIu [41], доступного через веб-сервис EzBioCloud [42].

Значение OrthoANIu между типовым штаммом *N. dassonvillei* subsp. *dassonvillei* DSM 443111^T и Т68 составило 97,75% (табл. 1), что превышает порог 95%, являющийся критерием принадлежности штаммов к одному виду [43].

Оценка значений парной *in silico* ДНК-ДНК-гибридизации, рассчитанной по формуле d4 [44], показала, что у разных клонов типового штамма *N. dassonvillei*, хранящихся в международных коллекциях под разными номерами (ATCC 23218, DSM 43111, NCTC 10488), величина dDDH с рассматриваемым штаммом Т68 составляет 79,6–79,8% (табл. 1), что выше 70% уровня, принятого как разграничение для штаммов одного вида [45].

Таким образом, на основе анализа филогенетического родства штамм Т68 можно отнести к виду *Nocardiosis dassonvillei* (табл. 1, рис. 1).

Фенотипические свойства штамма Т68. Как и типовые представители вида *N. dassonvillei* штамм Т68 развивается в аэробных условиях, положительно окрашивается по методу Грама и не образует подвижных

Таблица 1 / Table 1

Сравнительный анализ характеристик генома штамма Т68 и близких штаммов *Nocardiosis dassonvillei*
Comparative analysis of the genome of strain Tb8 and *Nocardiosis dassonvillei* related strains

Сравнительная характеристика Comparative characteristics	Т68 Tb8	ATCC 23218T	DSM 43111T	NCTC 10488T
Размер генома, млн п. н. Genome length, Mb	6,77	6,48	6,54	6,54
Содержание ГЦ пар, % GC-content, %	72,66	72,76	72,73	72,73
Средняя нуклеотидная идентичность с Т68, % Average nucleotide identity with Tb8, %	–	97,77	97,75	97,75
Цифровая ДНК-ДНК гибридизация, % dDDH, %	–	79,8	79,6	79,6
Номер доступа в ГенБанке GeneBank accession	–	GCA_012396345	GCA_000092985	GCA_900638215

Примечание: прочерк означает отсутствие информации по представленной сравнительной характеристике.
Note: a dash means no information on the presented comparative characteristics.

Ю. А. Буюклян, Ю. В. Закалюкина, А. Р. Белик, В. А. Алферова,
И. А. Остерман, М. В. Бирюков «Кахакамид А – ингибитор
ДНК-гиразы, выделенный из нового штамма продуцента
Nocardiosis dassonvillei T68». С. 49.

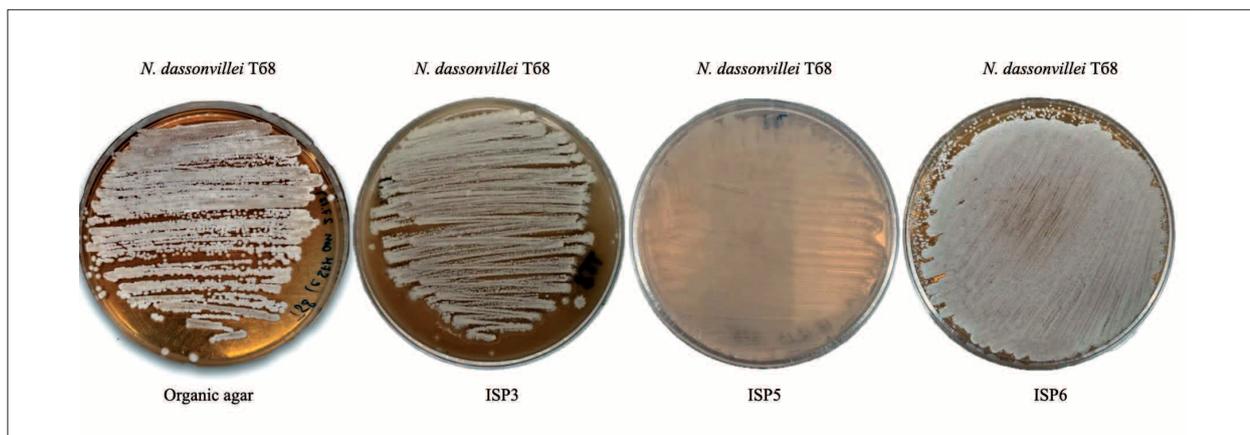


Рис. 2. Рост штамма *N. dassonvillei* T68 на плотных питательных средах на 5 сутки при 28 °С
Fig. 2. Growth of the *N. dassonvillei* Tb8 strain on solid nutrient media on day 5 at 28 °C

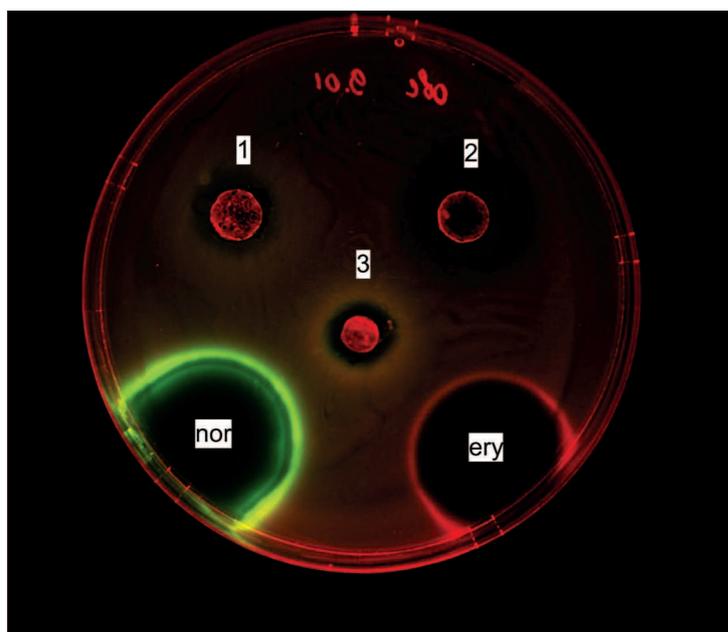


Рис. 4. Активность культуральной жидкости (1 – на среде ISP3, 2 – на среде органический агар) и агарового блока (3 – на среде органический агар) штамма T68 в отношении тест-организма *E. coli* JW5503 $\Delta tolC$, оснащённого двойной репортёрной системой pDualrep2
Fig. 4. Activity of the culture fluid (1 – on ISP3 medium, 2 – on organic agar medium) and agar block (3 – on organic agar medium) of strain Tb8 against the *E. coli* JW5503 $\Delta tolC$ test organism, equipped with the pDualrep2 dual reporter system

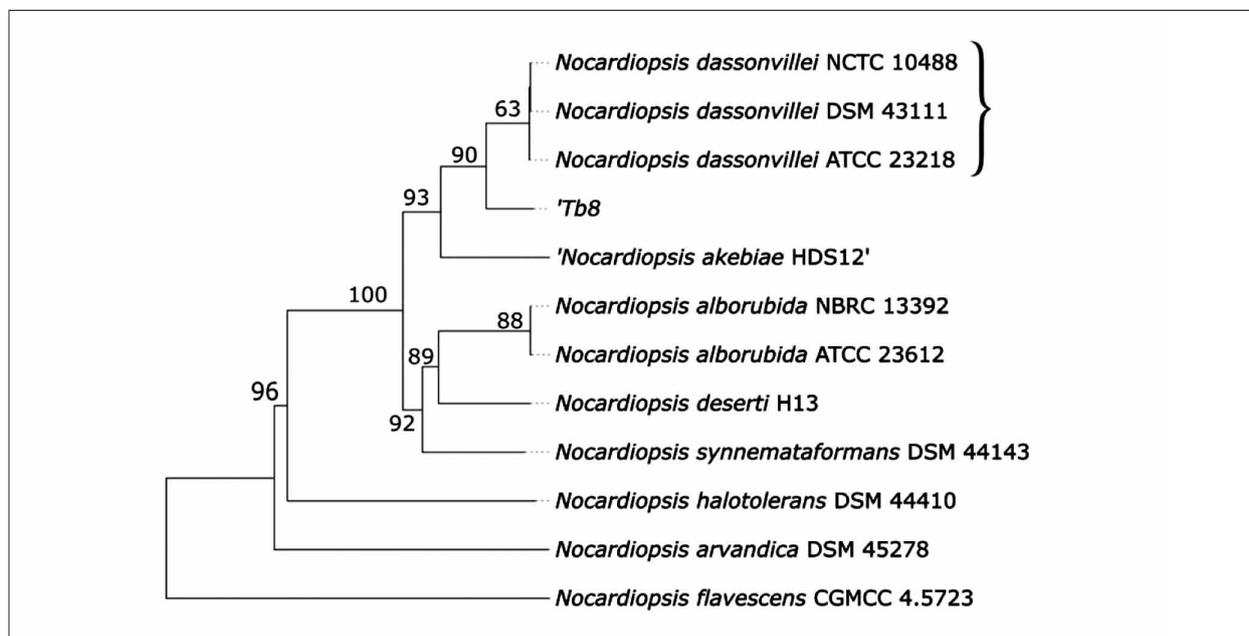


Рис. 1. Филогенетическое древо, основанное на полногеномных последовательностях штаммов Т68 и ближайших родственных типовых видах *Nocardioopsis*. Указаны значения бутстрэп-анализа выше 60%. Фигурной скобкой объединены полногеномные последовательности, принадлежащие одному типовому штамму *Nocardioopsis dassonvillei* в разных международных коллекциях микроорганизмов
Fig. 1. Phylogenetic tree based on whole genome sequences of T68 strains and the closest related type species of *Nocardioopsis*. Bootstrap analysis values above 60% are indicated. Full genome sequences belonging to *Nocardioopsis dassonvillei* one type strain in different international collections of microorganisms are combined in curly brackets

клеток. Обильно растёт на питательных средах Органический агар 79, IPS3 и ISP6 и умерено на среде IPS5 (рис. 2, см. цв. вкладку 1).

На используемых питательных средах окраска субстратного мицелия варьирует от бесцветной до желтоватой, воздушный мицелий от белого до серовато-палевого. При культивировании на овсяном агаре Т68 выделяет ярко-охристый растворимый пигмент, на среде с цитратом железа (ISP6) меланоидных пигментов не образует.

При росте на вышеуказанных плотных средах *N. dassonvillei* Т68 образует субстратный мицелий, на котором на 2–3 сут формируется хорошо развитый воздушный мицелий с прямыми или волнистыми гифами. Спустя 96–120 ч инкубации при 28 °С на воздушном мицелии формируются длинные цепочки спор с гладкой поверхностью (рис. 3).

Оценка устойчивости штамма Т68 к ряду антибиотиков с помощью диско-диффузионного метода, показала, что данный представитель *N. dassonvillei* резистентен к эритромицину, клиндамицину, цефтазидиму, тазобактаму, триметоприму и цефипему в рекомендованных концентрациях (табл. 2).

Кроме того, проводились исследования на способность штамма *N. dassonvillei* Т68

утилизировать различные источники углеводов с помощью диско-диффузионного метода (табл. 3).

Спектр утилизации углеводов для штамма *N. dassonvillei* Т68 имеет ряд отличий по сравнению с типовыми штаммами *N. dassonvillei* ATCC 23218, *N. dassonvillei* RG 719 и *N. dassonvillei* RG 1250. Штамм *N. dassonvillei* Т68 не утилизует адонит, дульцит, фруктозу, лактозу, маннозу и раффинозу. В сравнении с близкородственными таксонами для представителя *N. dassonvillei* Т68 наблюдается схожая тенденция к деструкции моносахаридов, таких как арабиноза, D-глюкоза, рамноза, дисахаридов, включающих мальтозу и сахарозу. Кроме того, типовые штаммы, наряду с *N. dassonvillei* Т68, способны использовать в качестве источника углерода шестиатомный спирт маннитол. Результаты ферментации остальных исследованных источников углерода совпадают с литературными данными для близкородственных таксонов [46].

Антибактериальная активность. В ходе первичного скрининга была обнаружена антибактериальная активность *N. dassonvillei* Т68 по отношению к *E. coli* JW5503 *ΔtolC* pDualrep2: продуцируемое вещество индуцировало экспрессию TurboRFP, что позволяет сделать

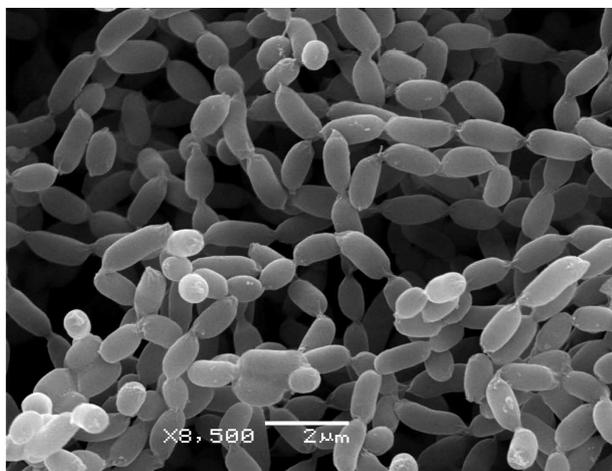


Рис. 3. Цепочки спор на воздушном мицелии штамма *N. dassonvillei* T68 на 4 сутки инкубации на среде органический агар 79 при 28 °С

Fig. 3. Spore chains on the aerial mycelium of strain *N. dassonvillei* T68 on the 4th day of incubation on organic agar 79 medium at 28 °C

предположение об активации SOS-ответа (рис. 4, см. цв. вкладку I).

В качестве положительных контролей на чашки были нанесены 0,05 мкг эритромицина (ингибитор биосинтеза белка), который вызывает экспрессию *Katushka2S*, и 1 мкг норфлоксацина (активирует SOS-ответ), который вызывает экспрессию *TurboRFP*. Для удобства флуоресцентные сигналы *Katushka2S* и *TurboRFP* визуализируются программным

обеспечением ChemiDoc MP красным и зелёным цветом соответственно. Ингибирование и индукция репортёрных флуоресцентных белков на штамме *E. coli* BW25143 *lptD* pDualrep2 отсутствовали. Помимо этого, *N. dassonvillei* T68 заметно подавлял рост клинически значимых изолятов *K. pneumoniae* ATCC 700603, *K. pneumoniae* ATCC 62867, *E. coli* ATCC 35705. Оптимальными условиями для продукции активного метаболита оказалось как поверхностное, так и глубинное культивирование на среде ISP3 при 28 °С.

Идентификация активного метаболита.

Активный метаболит штамма *N. dassonvillei* T68 был очищен с помощью твёрдофазной экстракции культуральной жидкости, в результате активность локализовалась во фракции 30% ацетонитрила. Полученная фракция была сконцентрирована и использована для последующего разделения и фракционирования с помощью ВЭЖХ.

Хромато-масс-спектрометрический анализ (ХМСА) данного вещества показал, что оно ионизируется в режиме регистрации положительных ионов и даёт интенсивные аддукты $[M+H]^+$ и $[2M+H]^+$ – 379,1476 и 757,2918, соответствующие точной массе 378.1476 Да (рис. 5).

С учётом характерного спектра поглощения для выделенного соединения в базах NPAtlas, Dictionary of Natural Products и

Таблица 2 / Table 2
Устойчивость к антибиотикам штамма *Nocardioopsis dassonvillei* T68
Antibiotic resistance of *Nocardioopsis dassonvillei* strain T68

№, п/п	Антибиотик / Antibiotic	Размер зоны лизиса, мм Lysis area, mm
1	Гентамицин, 10 мкг / Gentamycin, 10 µg	19
2	Эритромицин, 15 мкг / Erythromycin, 15 µg	–
3	Клиндамицин, 2 мкг / Clindamycin, 2 µg	–
4	Цефокситин, 30 мкг / Cefoxitin, 30 µg	24
5	Цефтазидим, 10 мкг / Ceftazidime, 10 µg	–
6	Тазобактам, 110 мкг / Tazobactam, 110 µg	16
7	Азтреонам, 30 мкг / Aztreonam, 30 µg	13
8	Ванкомицин, 10 мкг / Vancomycin, 10 µg	19
9	Триметоприм-сульфаметоксазол, 25 мкг Trimethoprim-sulfamethoxazole, 25 µg	50
10	Ципрофлоксацин, 5 мкг / Ciprofloxacin, 5 µg	27
11	Амоксициллин, 30 мкг / Amoxicillin, 30 µg	17
12	Триметоприм, 25 мкг / Trimethoprim, 25 µg	–
13	Тобрамицин, 10 мкг / Tobramycin, 10 µg	27
14	Амикацин, 30 мкг / Amikacin, 30 µg	38
15	Цефепим, 30 мкг / Cefepime, 30 µg	–

Примечание: прочерк означает отсутствие зоны лизиса при действии антибиотика.
Note: a dash means no lysis area on antibiotic action.

Таблица 3 / Table 3

Утилизация источников углеводов штаммом *N. dassonvillei* Т68 и наиболее филогенетически близких ему *N. dassonvillei* ATCC 23218, *N. dassonvillei* DSM 43111^T и *N. dassonvillei* NCTC 10488^T на среде ISP9 / Utilization of carbohydrate sources by strain *N. dassonvillei* Tb8 and the most phylogenetically similar *N. dassonvillei* ATCC 23218, *N. dassonvillei* DSM 43111^T, and *N. dassonvillei* NCTC 10488^T on ISP9 medium

№, п/п	Источник углевода Carbon source	Т68 Tb8	ATCC 23218T [46]	DSM 43111T [46]	NCTC 10488T [46]
1	Арабиноза / Arabinose	+	+	+	+
2	D-глюкоза / D-glucose	+	+	+	+
3	Мальтоза / Maltose	+	+	+	+
4	Маннит / Mannitol	+	+	+	+
5	Рамноза / Rhamnose	+	+	+	+
6	Сахароза / Sucrose	+	+	+	+
7	Фруктоза / Fructose	-	+	+	+
8	Лактоза / Lactose	-	+	+	+
9	Манноза / Mannose	-	+	+	+
10	Адонит / Adonitol	-	+	-	-
11	Дульцит / Dulcitol	-	+	-	-
12	Раффиноза / Raffinose	-	+	-	-
13	Целлобиоза / Cellobiose	+	n.d.	n.d.	n.d.
14	Галактоза / Galactose	+	n.d.	n.d.	n.d.
15	Инулин / Inulin	-	n.d.	n.d.	n.d.
16	Салицин / Salicin	-	n.d.	n.d.	n.d.
17	Сорбит / Sorbitol	-	n.d.	n.d.	n.d.
18	Мелибиоза / Melbiose	-	n.d.	n.d.	n.d.

Примечание: прочерк означает отсутствие утилизации источника углевода; n.d. – не обнаружено данных.
Note: a dash means no utilization of the carbohydrate source; n.d. – no data found.

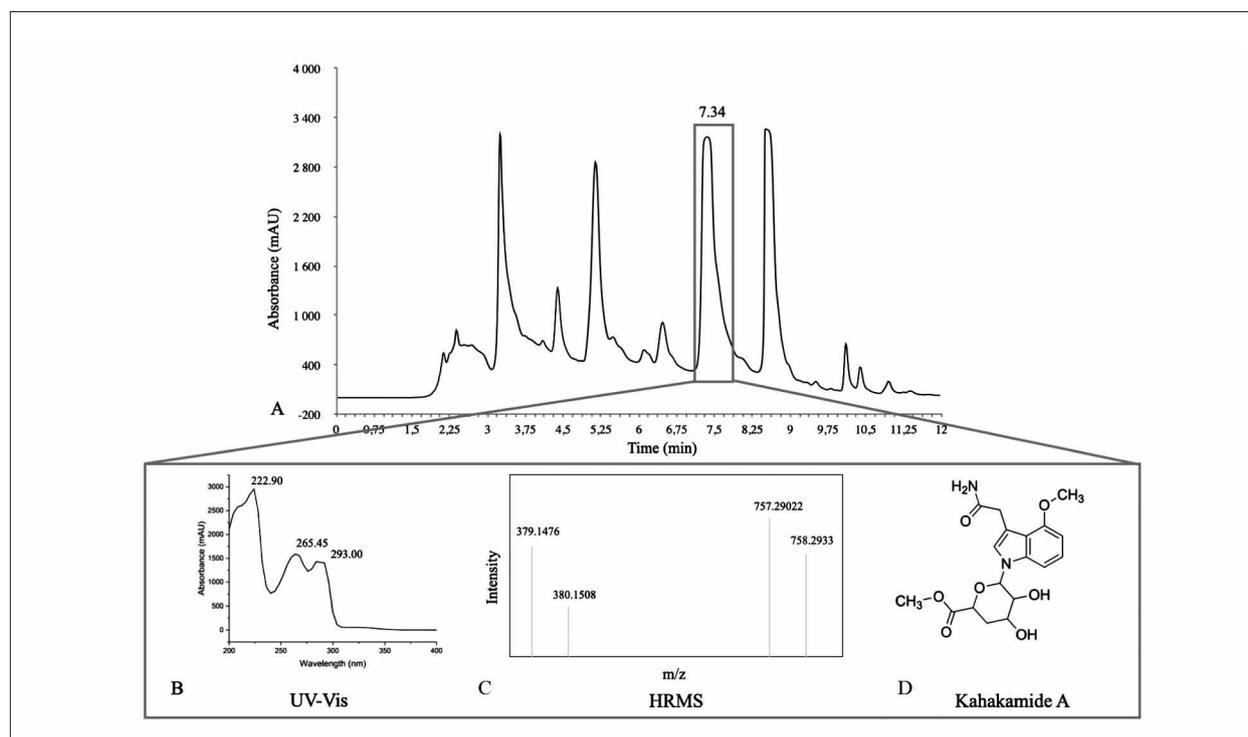


Рис. 5. Профиль ВЭЖХ (А), УФ-спектр поглощения (В), масс-спектр (С), пространственная структура (D) активного компонента, соответствующего кахакамиду А, из *N. dassonvillei* Т68
Fig. 5. HPLC profile (A), UV absorption spectrum (B), mass spectrum (C), and spatial structure (D) of the active component corresponding to Kahakamide A from *N. dassonvillei* Tb8

PubChem был выявлен кандидат с брутто-формулой $C_{18}H_{22}N_2O_7$ (точная масса 378,14270, отклонение 2,6 ppm).

Таким образом, представители филума Actinomycetota являются основными продуцентами природных антибиотиков, используемых в терапевтической практике. Вторичные метаболиты, синтезируемые актиномицетами, способны подавлять рост многих бактериальных патогенов, в том числе и антибиотикорезистентных, как например, метициллин-устойчивый *S. aureus*, *K. pneumoniae* и других. При этом данные соединения могут быть нацелены на различные мишени в пределах бактериальных клеток, например, способны ингибировать трансляцию, необратимо связываться с ферментами, участвующими в синтезе клеточной стенки, нарушать целостность цитоплазматической мембраны, а также могут ингибировать процесс репликации ДНК.

В ходе скрининга актиномицетов, выделенных из природных местообитаний, с применением высокоэффективной мишень-ориентированной репортёрной системы pDualrep2 мы выделили штамм Т68, демонстрировавший антагонистическую активность против модельных штаммов и вызвавший индукцию репортёрной системы, свидетельствующую об активации SOS-ответа. Данный штамм был идентифицирован с помощью полифазного анализа как представитель вида *Nocardiosis dassonvillei*.

В ходе твёрдофазной экстракции культуральной жидкости штамма *N. dassonvillei* Т68 с последующим ВЭЖХ-фракционированием удалось выделить активное соединение, ХМСА которого позволил предположить в качестве кандидата соединение кахакамид А (3-(2-амино-2-оксоэтил)-1-(4-дезоксигексопиранозилуринозил)-4-метокси-1Н-индол, что подтверждается совпадением точной массы и характерных УФ-спектров с литературными данными.

Вид *N. dassonvillei* обладает непростым таксономическим прошлым: первый представитель был выделен Брок-Руссо в 1904 г. из испорченного зерна и описан как *Streptothrix dassonvillei*, затем в 1911 г. Лигардом и Ландрё из конъюнктивального мешка пациента был выделен схожий актиномицет, названный авторами *Nocardia dassonvillei* [47], но позднее причисленный Лешевалье к роду *Actinomadura*. И лишь в 1976 г. Майер описал новый род *Nocardiosis*, опираясь на хемотаксономические особенности представителей данного рода, отличительной особенностью

которых являлось отсутствие диаминопимелиновой кислоты и мадуросы в составе пептидогликанового слоя клеточной стенки [46].

Внедрение в таксономию прокариот молекулярно-генетических подходов не только подтвердило филогенетическую обособленность рода *Nocardiosis*, но и позволило выделить в филуме Actinomycetota отдельное семейство Nocardiosisaceae [48], в настоящее время включающее в себя 13 родов и 63 вида и постоянно пополняющееся за счёт новых таксонов актиномицетов, чаще всего выделяемых из морских осадков.

Представителей *N. dassonvillei*, в основном, выделяют из различных почв, морских отложений, растительных субстратов, а также, в отдельных случаях, из тканей человека и животных, где они предположительно могут вызывать кожные инфекции и лёгочные заболевания [46, 49].

Следует отметить, что *Nocardiosis* принадлежит к так называемым «редким родам актиномицетов», традиционно противопоставляемым широко распространённым и многочисленным представителям рода *Streptomyces* [50]. Штаммы редких родов могут быть ценным источником активных соединений, которые ранее не были идентифицированы [50].

Согласно литературным данным, представители *N. dassonvillei* способны продуцировать различные вещества, обладающие способностью нарушать репликацию ДНК, в частности, интеркалировать в двуцепочечную молекулу и ингибировать активность ДНК-гиразы, такие как: диэтиловый эфир 4,8-диаза-2,9-добензоил-5,6-дифенил-2,8-декадиендиовой кислоты и 1-[1,2,4] триазол-1-илэтанон [49]. В этой работе исследователи предположили механизм действия указанных молекул на основании их структуры с помощью метода молекулярного моделирования. Для вышечисленных соединений присуща антагонистическая активность против ряда патогенных штаммов: *P. aeruginosa*, *S. aureus* и *B. cereus*, причём максимум ингибирования характерен для *S. aureus* [52]. Для кахакамида А также была выявлена активность против патогенных штаммов, включающих *K. pneumoniae*.

Говоря про структуру молекулы кахакамида А, важно отметить наличие 4-метокси-1Н-индол группы, имеющей структурное сходство с пуриновыми азотистыми основаниями – аденином и гуанином, которые являются составной частью нуклеотидов в молекуле ДНК или РНК, а также с молекулами АТФ

и ГТФ. Такой тип активных соединений выделяют в отдельную группу нуклеозидных антибиотиков, поскольку они являются производными нуклеотидов и нуклеозидов, которые играют существенную роль в фундаментальных клеточных процессах, поэтому данная группа молекул имеет широкий спектр биологической активности [53, 54]. Традиционно выделяют три группы нуклеозидных антибиотиков на основании их биологической функции: антибактериальные нуклеозиды – ингибируют биосинтез клеточной стенки, связываясь с phospho-N-acetylmuramyl-pentapeptide [55], антифунгальные нуклеозиды – также нацелены на биосинтез клеточной стенки, ингибируют хитинсинтазу [56]. Кроме того, существуют нуклеозидные антибиотики – ингибиторы биосинтеза белка, мишенью которых является пептидил-трансферазный центр на 50S рибосомальной субъединице.

Как было описано ранее, антибиотик кахакамид А вызывает индукцию SOS-ответа у репортёрной системы pDualrep2. Таким образом, в качестве мишени для данной молекулы может выступать молекулярный процесс репликации ДНК. Высокое сродство кахакамида А к молекуле ДНК может быть объяснено структурным сходством с нуклеозидами, которые являются компонентами ДНК. Ингибирующая активность кахакамида А обусловлена его способностью интеркалировать в молекулу ДНК, тем самым выступать стерическим препятствием на пути ДНК-гиразы, и как следствие блокировать движение репликативной вилки [57].

Важно отметить, что в литературе нет упоминаний об индукции SOS-ответа представителями нуклеозидных антибиотиков, такая ингибирующая активность была выявлена в данной работе с помощью мишень-ориентированной репортёрной системы pDualrep2.

Заключение

Интегрирование современных высокопроизводительных мишень-ориентированных подходов в традиционные методы скрининга позволяет с высокой эффективностью выявлять новые биологически-активные соединения, а также идентифицировать механизм действия уже известных молекул. Структура соединения кахакамид А была описана в 2001 г. и до настоящего момента сообщалось лишь об антагонистической активности против *Bacillus subtilis*, однако механизм действия до

настоящего времени не удавалось установить. В этом исследовании с помощью репортёрной системы pDualrep2 удалось обнаружить продуцент кахакамида А и определить, что механизм действия данной молекулы связан с индукцией SOS-ответа в бактериальной клетке, что ранее не было показано для нуклеозидных антибиотиков.

Штамм *N. dassonvillei* T68 был отобран на основе его способности подавлять рост модельного штамма *E. coli* JW5503 *AtolC*, характеризующегося делецией гена *AtolC*. В дальнейших исследованиях выделенное активное вещество подавляло ряд клинически-релевантных штаммов *K. pneumoniae* ATCC 700603, *K. pneumoniae* ATCC 62867, *E. coli* ATCC 35705, характеризующихся устойчивостью к широкому спектру бета-лактамаз.

В настоящее время не описан генетический кластер кахакамида А, нет понимания, как осуществляется биосинтез этого вещества, насколько оно распространено среди представителей рода *Nocardiosis*, – всё это может являться предметом дальнейших исследований.

Высокопроизводительный скрининг с использованием системы pDualrep2 повышает эффективность поиска новых биологически-активных молекул и позволяет на ранних стадиях выявлять механизм действия вторичного метаболита, тем самым отбирать только перспективные соединения и искать пути для разработки препаратов комплексной противомикробной и противовоспалительной терапии.

Финансирование работы осуществлялось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-10-2021-093; проект [BTH-RND-2127]).

References

1. Mohr K.I. History of antibiotics research // Curr. Top. Microbiol. Immunol. 2016. V. 398. P. 237–272. doi: 10.1007/82_2016_499
2. Breijyeh Z., Jubeh B., Karaman R. Resistance of Gram-negative bacteria to current antibacterial agents and approaches to resolve it // Molecules. 2020. V. 25. No. 6. Article No. 1340. doi: 10.3390/molecules25061340
3. Abdelaziz S.M., Aboshanab K.M., Yahia I.S., Yassien M.A., Hassouna N.A. Correlation between the antibiotic resistance genes and susceptibility to antibiotics among the carbapenem-resistant Gram-negative pathogens // Antibiotics. 2021. V. 10. No. 3. Article No. 255. doi: 10.3390/antibiotics10030255
4. Michael C.A., Dominey-Howes D., Labbate M. The antimicrobial resistance crisis: causes, consequences, and

- management // Front. Public Health. 2014. V. 2. Article No. 145. doi: 10.3389/fpubh.2014.00145
5. Mancuso G., Midiri A., Gerace E., Biondo C. Bacterial antibiotic resistance: The most critical pathogens // Pathogens. 2021. V. 10. No. 10. Article No. 1310. doi: 10.3390/pathogens10101310
6. De Oliveira D.M.P., Forde D.M., Kidd T.J., Harris P.N.A., Schembri M.A., Beatson S.A., Paterson D.L., Walker M.J. Antimicrobial resistance in ESKAPE pathogens // Clin. Microbiol. Rev. 2020. V. 33. No. 3. Article No. e00181-19. doi: 10.1128/cmr.00181-19
7. Wright G.D. Antibiotics: a new hope // Chem. Biol. 2012. V. 19. No. 1. P. 3–10. doi: 10.1016/j.chembiol.2011.10.019
8. Zhu Y., Huang W.E., Yang Q. Clinical perspective of antimicrobial resistance in bacteria // Infect. Drug Resist. 2022. V. 15. P. 735–746. doi: 10.2147/IDR.S345574
9. Alferova V.A., Maviza T.P., Biryukov M.V., Zakalyukina Y.V., Lukianov D.A., Skvortsov D.A., Vasilyeva L.A., Tashlitsky V.N., Polshakov V.I., Sergiev P.V., Korshun V.A., Osterman I.A. Biological evaluation and spectral characterization of a novel tetracenomycin X congener // Biochimie. 2022. V. 192. P. 63–71. doi: 10.1016/j.biochi.2021.09.014
10. Osterman I.A., Komarova E.S., Shiryaev D.I., Korniltsev I.A., Khven I.M., Lukyanov D.A., Tashlitsky V.N., Serebryakova M.V., Efremenkova O.V., Ivanenkov Y.A., Bogdanov A.A., Sergiev P.V., Dontsova O.A. Sorting out antibiotics' mechanisms of action: a double fluorescent protein reporter for high-throughput screening of ribosome and DNA biosynthesis inhibitors // Antimicrob. Agents Chemother. 2016. V. 60. No. 12. P. 7481–7489. doi: 10.1128/aac.02117-16
11. Mahajan G.B., Balachandran L. Antibacterial agents from actinomycetes – a review // Front. Biosci. (Elite Ed). 2012. V. 4. No. 1. P. 240–253. doi: 10.2741/373
12. Sousa J.A.J., Olivares F.L. Plant growth promotion by streptomycetes: ecophysiology, mechanisms and applications // Chem. Biol. Technol. Agric. 2016. V. 3. No. 1. Article No. 24. doi: 10.1186/s40538-016-0073-5
13. Tian X., Zhang Z., Yang T., Chen M., Li J., Chen F., Yang J., Li W., Zhang B., Zhang Z., Wu J., Zhang C., Long L., Xiao J. Comparative genomics analysis of *Streptomyces* species reveals their adaptation to the marine environment and their diversity at the genomic level // Front. Microbiol. 2016. V. 7. Article No. 998. doi: 10.3389/fmicb.2016.00998
14. Aminov R. History of antimicrobial drug discovery: Major classes and health impact // Biochem. Pharmacol. 2017. V. 133. P. 4–19. doi: 10.1016/j.bcp.2016.10.001
15. Barka E.A., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Meier-Kolthoff J.P., Klenk H.P., Clément C., Ouhdouch Y., van Wezel G.P. Taxonomy, physiology, and natural products of *Actinobacteria* // Microbiol. Mol. Boil. Rev. 2015. V. 80. No. 1. P. 1–43. doi: 10.1128/mnbr.00019-15
16. Chabou S., Leangapichart T., Okdah L., Le Page S., Hadjadj L., Rolain J.M. Real-time quantitative PCR assay with Taqman® probe for rapid detection of MCR-1 plasmid-mediated colistin resistance // New Microbes New Infect. 2016. V. 13. P. 71–74. doi: 10.1016/j.nmni.2016.06.017
17. Cornell C.R., Marasini D., Fakhr M.K. Molecular characterization of plasmids harbored by actinomycetes isolated from the great salt plains of Oklahoma using PFGE and next generation whole genome sequencing // Front. Microbiol. 2018. V. 9. Article No. 2282. doi: 10.3389/fmicb.2018.02282
18. Ventura M., Canchaya C., Tauch A., Chandra G., Fitzgerald G.F., Chater K.F., van Sinderen D. Genomics of Actinobacteria: tracing the evolutionary history of an ancient phylum // Microbiol. Mol. Boil. Rev. 2007. V. 71. No. 3. P. 495–548. doi: 10.1128/MMBR.00005-07
19. Osterman I.A., Wieland M., Maviza T.P., Lashkevich K.A., Lukianov D.A., Komarova E.S., Zakalyukina Y.V., Buschauer R., Shiriaev D.I., Leyn S.A., Zlamal J.E., Biryukov M.V., Skvortsov D.A., Tashlitsky V.N., Polshakov V.P., Cheng J., Polikanov Y.S., Bogdanov A.A., Osterman A.L., Dmitriev S.E., Beckmann R., Dontsova O.A., Daniel N Wilson D.N., Sergiev P.V. Tetracenomycin X inhibits translation by binding within the ribosomal exit tunnel // Nat. Chem. Biol. 2020. V. 16. No. 10. P. 1071–1077. doi: 10.1038/s41589-020-0578-x
20. Schumacher R.W., Harrigan B.L., Davidson B.S. Kahakamides A and B, new neosidomycin metabolites from a marine-derived actinomycete // Tetrahedron Lett. 2001. V. 42. No. 31. P. 5133–5135. doi: 10.1016/S0040-4039(01)00979-0
21. Volynkina I.A., Zakalyukina Y.V., Alferova V.A., Belik A.R., Yagoda D.K., Nikandrova A.A., Buyuklyan Y.A., Udalov A.V., Golovin E.V., Kryakvin M.A., Lukianov D.A., Biryukov M.V., Sergiev P.V., Dontsova O.A., Osterman I.A. Mechanism-based approach to new antibiotic producers screening among actinomycetes in the course of the citizen science project // Antibiotics. 2022. V. 11. No. 9. Article No. 1198. doi: 10.3390/antibiotics11091198
22. Baranova A.A., Chistov A.A., Tyurin A.P., Prokhorenko I.A., Korshun V.A., Biryukov M.V., Alferova V.A., Zakalyukina Y.V. Chemical ecology of *Streptomyces albidoflavus* strain A10 associated with carpenter ant *Camponotus vagus* // Microorganisms. 2020. V. 8. No. 12. Article No. 1948. doi: 10.3390/microorganisms8121948
23. Gause G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Guide for determination of Actinomycetes: Genera *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, and *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 246 p. (in Russian).
24. Shirling E.B., Gottlieb D. Methods for characterization of *Streptomyces* species // Int. J. Syst. Bacteriol. 1966. V. 16. No. 3. P. 313–340. doi: 10.1099/00207713-16-3-313
25. Zakalyukina Y.V., Biryukov M.V., Golichenkov M.V., Netrusov A.I. Phenotypic and phylogenetic

characterization of actinomycetes isolated from *Lasius niger* and *Formica cunicularia* ants // Moscow Univ. Biol. Sci. Bull. 2017. V. 72. No. 1. P. 13–19. doi: 10.3103/S0096392517010072

26. Pribjelski A., Antipov D., Meleshko D., Lapidus A., Korobeynikov A. Using SPAdes de novo assembler // Curr. Protoc. Bioinformatics. 2020. V. 70. No. 1. Article No. e102. doi: 10.1002/cpbi.102

27. Seemann T. Prokka: rapid prokaryotic genome annotation // Bioinformatics. 2014. V. 30. No. 14. P. 2068–2069. doi: 10.1093/bioinformatics/btu153

28. Blin K., Shaw S., Augustijn H.E., Reitz Z.L., Biermann F., Alanjary M., Fetter A., Terlouw B.R., Metcalf W.W., Helfrich E.J.N., van Wezel G.P., Medema M.H., Weber T. antiSMASH 7.0: New and improved predictions for detection, regulation, chemical structures and visualisation // Nucleic Acids Res. 2023. V. 51. No. W1. P. W46–W50. doi: 10.1093/nar/gkad344

29. TYGS – Application Programming Interface [Internet resource] <https://tygs.dsmz.de/> (Accessed: 13.01.2024).

30. Ondov B.D., Treangen T.J., Melsted P., Mallonee A.B., Bergman N.H., Koren S., Phillippy A.M. Mash: fast genome and metagenome distance estimation using MinHash // Genome Biol. 2016. V. 17. No. 1. Article No. 132. doi: 10.1186/s13059-016-0997-x

31. Lefort V., Desper R., Gascuel O. FastME 2.0: A comprehensive, accurate, and fast distance-based phylogeny inference program // Mol. Biol. Evol. 2015. V. 32. No. 10. P. 2798–2800. doi: 10.1093/molbev/msv150

32. Schatz A., Bugle E., Waksman S.A. Streptomycin, a substance exhibiting antibiotic activity against gram-positive and gram-negative bacteria // Proc. Soc. Exp. Biol. Med. 1944. V. 55. No. 1. P. 66–69. doi: 10.3181/00379727-55-14461

33. Reller L.B., Weinstein M., Jorgensen J.H., Ferraro M.J. Antimicrobial susceptibility testing: a review of general principles and contemporary practices // Clin. Infect. Dis. 2009. V. 49. No. 11. P. 1749–1755. doi: 10.1086/647952

34. Zakalyukina Y.V., Pavlov N.A., Lukianov D.A., Marina V.I., Belozeroва O.A., Tashlitsky V.N., Guglya E.B., Osterman I.A., Biryukov M.V. A new albomycin-producing strain of *Streptomyces globisporus* subsp. *globisporus* may provide protection for ants *Messor structor* // Insects. 2022. V. 13. No. 11. Article No. 1042. doi: 10.3390/insects13111042

35. Kohlbacher O., Reinert K., Gröpl C., Lange E., Pfeifer N., Schulz-Trieglaff O., Sturm M. TOPP – the OpenMS proteomics pipeline // Bioinformatics. 2007. V. 23. No. 2. P. e191–e197. doi: 10.1093/bioinformatics/btl299

36. Wang M., Carver J.J., Phelan V.V., Sanchez L.M., Garg N., Peng Y., Nguyen D.D., Watrous J., Kapono C.A., Luzzatto-Knaan T., Porto C., Bouslimani A., Melnik A.V., Meehan M.J., Liu W.T., Crüsemann M., Boudreau P.D., Esquenazi E., Sandoval-Calderón M., Kersten R.D., Pace L.A.,

Quinn R.A., Duncan K.R., Hsu C.C., Floros D.J., Gavilan R.G., Kleigrewe K., Northen T., Dutton R.J., Parrot D., Carlson E.E., Aigle B., Michelsen C.F., Jelsbak L., Sohlenkamp C., Pezner P., Edlund A., McLean J., Piel J., Murphy B.T., Gerwick L., Liaw C.C., Yang Y.L., Humpf H.U., Maansson M., Keyzers R.A., Sims A.C., Johnson A.R., Sidebottom A.M., Sedio B.E., Klitgaard A., Larson C.B., P. C.A.B., Torres-Mendoza D., Gonzalez D.J., Silva D.B., Marques L.M., Demarque D.P., Pociute E., O'Neill E.C., Briand E., Helfrich E.J.N., Granatosky E.A., Glukhov E., Ryffel F., Houson H., Mohimani H., Kharbush J.J., Zeng Y., Vorholt J.A., Kurita K.L., Charusanti P., McPhail K.L., Nielsen K.F., Vuong L., Elfeki M., Traxler M.F., Engene N., Koyama N., Vining O.B., Baric R., Silva R.R., Mascuch S.J., Tomasi S., Jenkins S., Macherla V., Hoffman T., Agarwal V., Williams P.G., Dai J., Neupane R., Gurr J., Rodriguez A.M.C., Lamsa A., Zhang C., Dorrestein K., Duggan B.M., Almaliti J., Allard P.M., Phapale P., Nothias L.F., Alexandrov T., Litaudon M., Wolfender J.L., Kyle J.E., Metz T.O., Peryea T., Nguyen D.T., VanLeer D., Shinn P., Jadhav A., Müller R., Waters K.M., Shi W., Liu X., Zhang L., Knight R., Jensen P.R., Palsson B.O., Pogliano K., Lington R.G., Gutiérrez M., Lopes N.P., Gerwick W.H., Moore B.S., Dorrestein P.C., Bandeira N. Sharing and community curation of mass spectrometry data with Global Natural Products Social Molecular Networking // Nat. Biotechnol. 2016. V. 34. No. 8. P. 828–837. doi: 10.1038/nbt.3597

37. Van Santen J.A., Jacob G., Singh A.L., Aniebok V., Balunas M.J., Bunsko D., Neto F.C., Castaño-Espriu L., Chang C., Clark T.N., Cleary Little J.L., Delgadillo D.A., Dorrestein P.C., Duncan K.R., Egan J.M., Galey M.M., Haackl F.P.J., Hua A., Hughes A.H., Iskakova D., Khadilkar A., Lee J.H., Lee S., LeGrow N., Liu D.Y., Macho J.M., McCaughey C.S., Medema M.H., Neupane R.P., O'Donnell T.J., Paula J.S., Sanchez L.M., Shaikh A.F., Soldatou S., Terlouw B.R., Tran T.A., Valentine M., van der Hooft J.J.J., Vo D.A., Wang M., Wilson D., Zink K.E., Lington R.G. The Natural Products Atlas: An open access knowledge base for microbial natural products discovery // ACS Cent. Sci. 2019. V. 5. No. 11. P. 1824–1833. doi: 10.1021/acscentsci.9b00806

38. Van Santen J.A., Poynton E.F., Iskakova D., McMan E., Alsup T.A., Clark T.N., Fergusson C.H., Fewer D.P., Hughes A.H., McCadden C.A., Parra J., Soldatou S., Rudolf J.D., Janssen E.M., Duncan K.R., Lington R.G. The Natural Products Atlas 2.0: a database of microbially-derived natural products // Nucleic Acids Res. 2022. V. 50. No. D1. P. D1317–D1323. doi: 10.1093/nar/gkab941

39. Nouioua I., Carro L., García-López M., Meier-Kolthoff J.P., Woyke T., Kyrpidis N.C., Pukall R., Klenk H.P., Goodfellow M., Göker M. Genome-based taxonomic classification of the phylum *Actinobacteria* // Front. Microbiol. 2018. V. 9. Article No. 2007. doi: 10.3389/fmicb.2018.02007

40. LPSN – List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature [Internet resource] <https://lpsn.dsmz.de/> (Accessed: 13.01.2024).

41. Lee I., Ouk Kim Y., Park S.C., Chun J. OrthoANI: An improved algorithm and software for calculating average nucleotide identity // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2016. V. 66. No. 2. P. 1100–1103. doi: 10.1099/ijsem.0.000760
42. EzBioCloud Database [Internet resource] <https://ezbiocloud.net/> (Accessed: 13.01.2024).
43. Ciuffo S., Kannan S., Sharma S., Badretin A., Clark K., Turner S., Brover S., Schoch C.L., Kimchi A., DiCuccio M. Using average nucleotide identity to improve taxonomic assignments in prokaryotic genomes at the NCBI // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2018. V. 68. No. 7. P. 2386–2392. doi: 10.1099/ijsem.0.002809
44. TYGS: a novel high-throughput platform for state-of-the-art genome-based taxonomy [Internet resource] <https://ggdc.dsmz.de> (Accessed: 13.01.2024).
45. Meier-Kolthoff J.P., Göker M. TYGS is an automated high-throughput platform for state-of-the-art genome-based taxonomy // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. No. 1. Article No. 2182. doi: 10.1038/s41467-019-10210-3
46. Meyer J. *Nocardiopsis*, a new genus of the order *Actinomycetales* // *Int. J. Syst. Bacteriol.* 1976. V. 26. No. 4. P. 487–493. doi: 10.1099/00207713-26-4-487
47. Liégard H., Landrieu M. Un cas de mycose conjunctivale // *Ann. Ocul. (Paris)*. 1911. V. 146. P. 418–426. doi: 10.4056/sigs.1363462
48. Rainey F.A., Ward-Rainey N., Kroppenstedt R.M., Stackebrandt E. The genus *Nocardiopsis* represents a phylogenetically coherent taxon and a distinct actinomycete lineage: proposal of *Nocardiopsaceae* fam. nov // *Int. J. Syst. Bacteriol.* 1996. V. 46. No. 4. P. 1088–1092. doi: 10.1099/00207713-46-4-1088
49. Priyanka S., Jayashree M., Shivani R., Anwesa S., Bhaskara Rao K.V., I A.E. Characterisation and identification of antibacterial compound from marine actinobacteria: *In vitro* and *in silico* analysis // *J. Infect. Public Health.* 2019. V. 12. No. 1. P. 83–89. doi: 10.1016/j.jiph.2018.09.005
50. Parra J., Beaton A., Seipke R.F., Wilkinson B., Hutchings M.I., Duncan K.R. Antibiotics from rare actinomycetes, beyond the genus *Streptomyces* // *Curr. Opin. Microbiol.* 2023. V. 76. Article No. 102385. doi: 10.1016/j.mib.2023.102385
51. Gavrilidou A., Kautsar S.A., Zaburannyi N., Krug D., Müller R., Medema M. H., Ziemert N. Compendium of specialized metabolite biosynthetic diversity encoded in bacterial genomes // *Nat. Microbiol.* 2022. V. 7. No. 5. P. 726–735. doi: 10.1038/s41564-022-01110-2
52. Sengupta S., Pramanik A., Ghosh A., Bhattacharyya M. Antimicrobial activities of actinomycetes isolated from unexplored regions of Sundarbans mangrove ecosystem // *BMC Microbiol.* 2015. V. 15. Article No. 170. doi: 10.1186/s12866-015-0495-4
53. Niu G., Tan H. Nucleoside antibiotics: biosynthesis, regulation, and biotechnology // *Trends Microbiol.* 2015. V. 23. No. 2. P. 110–119. doi: 10.1016/j.tim.2014.10.007
54. Isono K. Nucleoside antibiotics: structure, biological activity, and biosynthesis // *J. Antibiot. (Tokyo)*. 1988. V. 41. No. 12. P. 1711–1739. doi: 10.7164/antibiotics.41.1711
55. Winn M., Goss R.J., Kimura K.I., Bugg T.D. Antimicrobial nucleoside antibiotics targeting cell wall assembly: recent advances in structure–function studies and nucleoside biosynthesis // *Nat. Prod. Rep.* 2010. V. 27. No. 2. P. 279–304. doi: 10.1039/b816215h
56. Kimura K., Bugg T.D. Recent advances in antimicrobial nucleoside antibiotics targeting cell wall biosynthesis // *Nat. Prod. Rep.* 2003. V. 20. No. 2. P. 252–273. doi: 10.1039/b202149h
57. Hiasa H., Shea M.E. DNA gyrase-mediated wrapping of the DNA strand is required for the replication fork arrest by the DNA gyrase-quinolone-DNA ternary complex // *J. Biol. Chem.* 2000. V. 275. No. 44. P. 34780–34786. doi: 10.1074/jbc.M001608200

Длина слепого отдела кишечника белой куропатки (*Lagopus lagopus*) на загрязнённых и фоновых территориях севера Красноярского края

© 2025. П. В. Кочкарёв¹, к. б. н., директор,
 М. А. Перевозчикова², к. в. н., с. н. с.,
 А. А. Сергеев², к. б. н., зам. директора по научной работе,
 В. В. Ширяев², д. б. н., в. н. с., В. Н. Пиминов², к. б. н., в. н. с.,
¹ФГБУ Государственный природный биосферный заповедник
 «Центральносибирский»,
 663246, Россия, Красноярский край,
 Туруханский район, пос. Бор, ул. Грибная, д. 1а,
²Всероссийский научно-исследовательский институт
 охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,
 e-mail: shiryaev49@mail.ru

Слепой отдел кишечника птиц, помимо ферментации непереваренных питательных веществ и модуляции симбионтной микрофлоры в пищеварительном тракте, участвует в рециркуляции азота и токсичных соединений, попадающих в организм животных с кормовыми объектами. Получены новые данные по морфометрическим параметрам кишечного тракта белой куропатки (*Lagopus lagopus* Linnaeus, 1758) на севере Красноярского края. Показатель длины слепого отдела кишечника достоверно определялся фактором загрязнённости территории и был достоверно выше на участках, подверженных загрязнению соединениями тяжёлых металлов. Содержание свинца, кадмия и железа в скелетной мускулатуре белых куропаток также оказалось выше на импактных полигонах по сравнению с фоновыми участками. Однако статистически значимой взаимосвязи между концентрацией свинца, кадмия, железа и меди и длиной слепого отдела кишечника выявлено не было. Причинами различий параметров слепого кишечника на импактных и фоновых территориях могут быть как непосредственное влияние токсичных элементов на организм птиц, так и различие в качественных параметрах корма, либо воздействие загрязнённых кормов на обилие и состав симбионтной микрофлоры. Необходимы дальнейшие исследования рассматриваемого вопроса. Собранные сведения могут быть использованы для экологического мониторинга территорий исследований в ближайшей и отдалённой перспективе в условиях высокой техногенной нагрузки на природные комплексы полярных регионов. В таких районах севера Красноярского края употребление населением в пищу мяса белых куропаток может представлять опасность из-за загрязнения кадмием, свинцом и другими поллютантами, существенно превышающими допустимые концентрации для пищевой продукции.

Ключевые слова: белая куропатка, питание, слепая кишка, тяжёлые металлы, загрязнение, биомониторинг.

Length of the willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) cecum in the Northern Krasnoyarsk Region

© 2025. P. V. Kochkarev¹ ORCID: 0000-0001-5995-3963,
 M. A. Perevozchikova² ORCID: 0000-0003-3638-3712, A. A. Sergeev² ORCID: 0000-0002-9461-5131,
 V. V. Shiryaev² ORCID: 0000-0002-4549-5727, V. N. Piminov² ORCID: 0009-0008-5092-1314,
¹State Natural Biosphere Reserve "Central Siberian",
 1a, Gribnaya St., Bor village, Turukhansky district, Russia, 663246,
²Russian Game Management and Fur Farming Research Institute
 named by Professor B.M. Zhitkov,
 79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: shiryaev49@mail.ru

morphometric parameters of the intestinal tract of willow ptarmigan (*Lagopus lagopus* Linnaeus, 1758) in the north of Krasnoyarsk Region. The caecum length was reliably determined by the territorial factor and was significantly higher in areas contaminated with heavy metal compounds. The lead, cadmium, and iron content in the skeletal muscles of willow ptarmigan was also higher in impact sites compared to background sites. However, no statistically significant correlations were found between the lead, cadmium, iron, and copper content and the length of the caecum. The reasons for the differences in the caecum length in the impact and background areas may be either the direct effect of toxic elements on the bird's body and the difference in the quality of feed, or the impact of contaminated feed on the abundance and composition of gut microbiom. Further research into this issue is needed. The obtained data can be used in the near and distant future for environmental monitoring of the study polar areas under high technogenic load on natural complexes. Consumption of partridge meat of willow ptarmigans by the population in the industrial areas of the northern Krasnoyarsk Region may pose a risk due to contamination with cadmium, lead and other pollutants, the content of which significantly exceeds permissible concentrations for food products.

Keywords: willow ptarmigan, food, avian caeca, heavy metals, pollution, biomonitoring.

Белая куропатка (*Lagopus lagopus* Linnaeus, 1758) – массовый вид тетеревиных птиц, широко распространённый в приполярных регионах, где куропатки служат популярным объектом охоты и ценным источником питания местного населения. Биология белой куропатки активно изучается в Евразии и Северной Америке. Особый интерес представляет её использование в качестве вида – биоиндикатора при импактном мониторинге [1].

Сезонность питания белых куропаток определяет адаптивные изменения морфофизиологических параметров кишечника, позволяющие в суровых условиях арктической зимы обеспечивать эффективную переработку пищи и сохранение положительного энергетического баланса. Особенности строения и функционирования слепого отдела кишечника определяют эффективность использования грубых растительных кормов путём пролонгации процесса пищеварения в 10–60 раз во время нахождения птиц в подснежных убежищах [2]. Слепой отдел кишечника у белых куропаток находится на соединении подвздошной и толстой кишок в виде пары удлинённых слепых мешочков, направленных вдоль подвздошной кишки. Стенки слепого кишечника покрыты сетью сложных ворсинок, а внутренняя поверхность имеет складчатую структуру. Усиленно развиты моторная, секреторная и всасывательная функции [3]. Выполняя активную самостоятельную роль в пищеварении, энергообмене и его регуляции, слепой кишечник также служит важнейшим резервуаром для деятельности симбионтных микроорганизмов. Особенности развития слепого кишечника белой куропатки обусловлены, главным образом, приспособлением к зимним кормам, которые включают в себя концевые побеги и почки различных видов ив (*Salix* sp.), карликовой (*Betula nana*) и бородавчатой (*B. pendula*) берёзы, чозении (*Chosenia arbutifolia*).

Полагают, что в слепом отделе кишечника происходит не только расщепление белков и жиров, всасывание продуктов расщепления, но и нейтрализация различных токсичных компонентов [4]. В зимний период всасывание в слепом кишечнике обеспечивает две трети основного обмена, позволяя птицам переживать суровые месяцы, не создавая существенных жировых запасов [2, 5].

При анализе химического состава экскрементов слепых кишок белых куропаток установлено, что в них содержится до 50% липидного компонента и ряд свободных жирных кислот. Это также подтверждает предположение, что слепой кишечник работает с большим запасом. При неблагоприятных условиях белые куропатки выделяют тем меньше экскрементов, чем полнее усваиваются питательные вещества в слепых кишках [6]. Выбросы слепого отдела кишечника у тетеревиных птиц содержат не более 6% целлюлозы, а характер содержимого показывает, что почти вся клетчатка идёт в прямую кишку, минуя слепой отдел. Белая куропатка способна усваивать до 20–27% целлюлозы, содержащейся в корме [2, 3].

Непрерывное функционирование слепых кишок зимой позволяет снабжать организм необходимыми веществами, что даёт возможность тетеревиным птицам в норме обходиться без запасания дополнительных энергетических резервов в виде жировых отложений. Тем не менее, известны исключения. Так, на Шпицбергене *Lagopus muta* зимой накапливают мощный слой жира в подкожных депо и на внутренних органах [7]. По нашим данным, на Южном Ямале в конце зимы 90% тундряных куропаток имели отложения подкожного жира в районе шейных аптерий.

Велика роль слепого кишечника не только в энергетическом, но и в белковом обмене. Мочевая кислота, благодаря обратной перистальтике прямой кишки, попадает в слепой

отдел, где её активно разлагает бактериальная флора, и азот возвращается в организм птицы [8, 9]. Так объясняется противоречие между белковой бедностью обильных доступных зимних кормов и хорошим физиологическим состоянием куропаток.

Одной из важных функций слепых кишок является поглощение электролитов и воды, где слепые кишки выступают в роли количественно наиболее важного сегмента пищеварительной системы [10].

Таким образом, работа слепого отдела совместно с деятельностью тонкого кишечника полностью обеспечивают птиц необходимой энергией в зимнее время. Учитывая, что в слепых кишках, возможно, происходит нейтрализация различных токсичных компонентов, позволяющих уменьшить проникновение поллютантов в организм животных, а подобные механизмы недостаточно исследованы, мы провели измерения длины слепого кишечника у белых куропаток на фоновых и загрязнённых территориях Красноярского края.

Цель исследований – изучить вариабельность морфологических параметров слепого кишечника белых куропаток в условиях химического загрязнения местообитаний.

Объекты и методы исследований

Материал для исследования – слепой кишечник взрослых белых куропаток – был собран в Таймырском Долгано-Ненецком районе Красноярского края России на загрязнённых горнодобывающими и металлургическими предприятиями территориях [11] и фоновых участках лесотундры. Загрязнённые участки находились в районе верхнего течения (71°04'08,5" с. ш., 85°25'53,0" в. д.) и устья р. Агапа (71°26'30,7" с. ш., 89°10'36,8" в. д.), а также в районе бывшего посёлка (бывш. пос.) Ананьино (69°45'33,7" с. ш., 85°40'46,7" в. д.). Фоновые участки – в окрестностях пос. Новая (71°19'08,7" с. ш., 99°18'44,8" в. д.) и пос. Волочанка (70°35'00,6" с. ш., 94°19'23,2" в. д.).

Отбор биоматериала производился в период осенней охоты в октябре-ноябре с 2005 по 2019 гг. Добычу белых куропаток осуществляли петлями и ружейным способом местные охотники из числа коренных и малочисленных народов Севера (КМНС) по соответствующим разрешениям. Добытые птицы (n=185; из них 95 самцов (♂), 90 самок (♀)) метились заранее изготовленной биркой, надетой на шею.

Измерения слепых кишок проводили после препарирования свежих тушек. Слепые

кишки вместе с кишечником выкладывали на белый лист бумаги и выпрямляли, не растягивая. Измерения проводили с помощью чертёжного кронциркуля (измеряли участками баллон и шейку слепой кишки, затем результаты замеров суммировали). Проверочные измерения проводили с помощью курвиметра.

Тушки замораживали в леднике при температуре –18 °С и помещали в отдельные новые пакеты из пищевого пластика. Затем их перевозили авиатранспортом в г. Дудинка, где в сертифицированной ветеринарной лаборатории одним из авторов производилась дальнейшая обработка материала. Тушки размораживали, вскрывали, отбирали пробы для микроэлементного анализа, который проводили в химической лаборатории Референтного центра Управления Федеральной службы Россельхознадзора по Красноярскому краю (г. Красноярск) на атомно-абсорбционных спектрофотометрах Sollax (TJA Solution, США) и Varian (Agilent Technologies, США). У добытых особей определяли концентрацию микроэлементов (Fe, Cu, Pb, Cd) в грудной мускулатуре (n=144). Концентрацию элементов определяли в пересчёте на натуральную влажность (н. в.).

Статистическая обработка полученных данных проводилась общепринятыми методами на персональном компьютере IBM с использованием программного обеспечения MS Excel (Office 2019) и Statgraphics (19-X64) [12]. Для описания выборок определяли среднее значение (M), стандартное отклонение (SD), медиану (Med), 25% и 75% процентиля. Поскольку были основания предполагать, что в ряде случаев распределение полученных нами значений отличалось от нормального, наряду с параметрическими активно использовались и непараметрические методы анализа [13]. Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовались критерии Стьюдента (t), Фишера, метод множественного сравнения Ньюмена-Кейсла, а также непараметрические критерии Манна-Уитни и Данна. Для сравнения нескольких независимых выборок по одному признаку применялся однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA-test) и непараметрический дисперсионный анализ с использованием критерия Краскала-Уоллиса. Для выяснения взаимосвязи между несколькими выборками рассчитывались коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, а также использовался регрессионный анализ. Нулевую гипотезу отклоняли на уровне значимости менее 0,05.

Результаты и обсуждение

Сведения о длине слепых отделов кишечника взрослых белых куропаток на фоновых и загрязнённых территориях севера Красноярского края представлены в таблице 1. Половых различий длины слепого отдела кишечника у взрослых птиц выявлено не было.

Однако на каждом из участков импактных территорий, за исключением участка у бывш. пос. Ананьино, длина слепых кишок куропатки оказалась достоверно выше, чем на фоновых участках. При этом общая длина слепого отдела кишечника составила на всех фоновых территориях $98,60 \pm 0,20$ см у самцов ($n=45$) и $98,60 \pm 0,17$ см у самок ($n=43$). На загрязнённых участках аналогичные показатели составили соответственно $102,60 \pm 0,27$ см у самцов ($n=50$) и $102,20 \pm 0,31$ см у самок ($n=47$) (рис. 1). На территориях исследования, загрязнённых тяжёлыми металлами, общая длина слепого

отдела кишечника была достоверно больше и у самцов ($t=11,4; p<0,01$), и у самок ($t=9,8; p<0,01$), по сравнению с фоновыми участками.

Корреляционный анализ показал положительную связь длины левых и правых слепых отростков у самцов и у самок на загрязнённых территориях (Верхняя Агапа: ♂ $r=0,85, p<0,01$; ♀ $r=0,78, p<0,01$) и на фоновых участках (пойма р. Новая: ♂ $r=0,66, p<0,01$; ♀ $r=0,67, p<0,01$; пос. Волочанка: ♂ $r=0,61, p<0,01$; ♀ $r=0,77, p<0,01$). При сравнении размеров слепого кишечника птиц фоновых и загрязнённых участков выявлена отрицательная зависимость в парах пойма р. Верхняя Агапа – пос. Волочанка (♀ $r=-0,52, p<0,01$) и бывш. пос. Ананьино – пос. Волочанка (♀ $r=-0,81, p<0,01$).

Посредством однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA-test) выявлено достоверное ($p=0,01$) влияние фактора территории

Таблица 1 / Table 1

Длина слепого отдела кишечника белых куропаток на территории Красноярского края, см
Willow ptarmigan caecum length, cm, in the Krasnoyarsk Region

Участки / Areas	n	Длина слепых кишок, см / Caecum length, cm			
		♂		♀	
		правые/ right min-max M±SD Med 25-75%	левые/ left min-max M±SD Med 25-75%	правые/ right min-max M±SD Med 25-75%	левые/ left min-max M±SD Med 25-75%
Участок поймы на р. Верхняя Агапа Verkhnyaya Agara 2005, 2009 гг.	♂ 30	49,00–52,50	49,50–52,50	48,50–52,50	48,50–52,00
	♀ 27	51,21±1,04 51,50 ^{A, B} 50,62–52,00	51,36±0,91 51,50 ^{A, B} 51,12–52,00	51,05±1,17 51,50 ^{A, B} 50,50–51,50	51,07±1,03 51,50 ^{A, B} 51,00–51,75
Участок поймы в устье р. Агапа / Agara 2019 г.	♂ 10	51,00–52,50	51,50–53,00	51,00–52,50	51,50–52,50
	♀ 10	51,80±0,48 51,75 ^{A, B} 51,50–52,00	52,25±0,42 52,25 ^{A, B} 52,00–52,50	52,05±0,49 52,0 ^{A, B} 52,00–52,50	51,90±0,45 51,75 ^{A, B} 51,50–52,37
Участок у бывш. пос. Ананьино / Ananino 2007 г.	♂ 10	48,50–51,50	49,00–51,50	48,00–51,00	48,50–51,50
	♀ 10	50,40±0,84 50,50 50,50–50,87	50,55±0,83 50,75 50,12–51,00	50,20±0,94 50,50 49,75–50,87	50,350±0,91 50,50 49,75–51,00
Участок поймы р. Новая у пос. Новая / Novaya 2007, 2014 гг.	♂ 23	47,50–50,00	47,50–50,50	48,50–50,50	48,50–50,50
	♀ 22	49,13±0,71 49,50 ^A 48,50–49,50	49,04±0,72 49,00 ^A 48,50–49,50	49,50±0,48 49,50 ^A 49,50–49,87	49,22±0,63 49,25 ^A 48,50–49,50
Участок у пос. Волочанка Volochanka 2006, 2016 гг.	♂ 22	48,50–50,50	48,50–50,50	48,50–50,50	48,00–50,50
	♀ 21	49,68±0,56 49,50 ^B 49,50–50,00	49,43±0,72 49,50 ^B 49,00–49,87	49,28±0,51 49,50 ^B 49,00–49,50	49,26±0,66 49,50 ^B 49,00–49,50

Примечание: A – различия достоверны между фоновым участком р. Новая и загрязнёнными территориями ($p<0,05$); B – различия достоверны между фоновым участком пос. Волочанка и загрязнёнными территориями ($p<0,05$).

Note: A – differences are significant between the background area of the Novaya River and the polluted areas ($p<0.05$); B – differences are significant between the background area of Volochanka and the polluted areas ($p<0.05$).

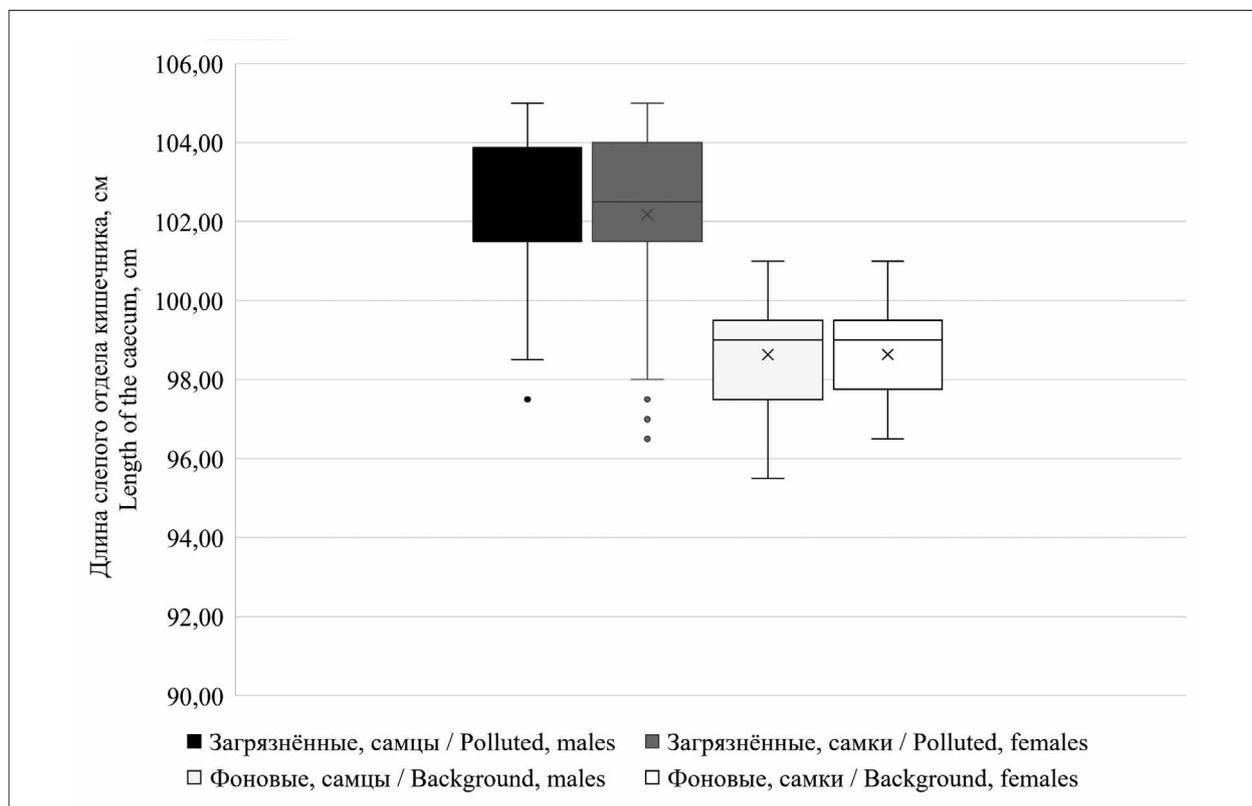


Рис. 1. Общая длина слепого отдела кишечника белых куропаток на фоновых и загрязнённых территориях Красноярского края

Fig. 1. Willow ptarmigan caecum total length in background and polluted areas of Krasnoyarsk Region

на длину слепого отдела кишечника у белой куропатки.

Содержание свинца, кадмия и железа в скелетной мускулатуре белых куропаток оказалось достоверно выше на импактных территориях по сравнению с фоновыми участками. Концентрации меди достоверно не различались (рис. 2). Подробный анализ микроэлементного состава органов и тканей этих птиц на севере Красноярского края был представлен нами ранее [14].

В научной литературе содержится ограниченное число сведений по морфологии слепого кишечника белой куропатки. На территории Красноярского края общая длина слепого отдела кишечника находилась в пределах видовой изменчивости (табл. 2).

Известно, что пищеварительный тракт птиц обладает высокой фенотипической гибкостью и реагирует на состав и пищевую ценность перевариваемых продуктов, что обеспечивает оптимальное усвоение питательных веществ и снижает метаболические затраты, связанные с неэффективной системой желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [22].

Полученные в нашем исследовании результаты не позволяют однозначно установить

причины различий длины слепого отдела кишечника у птиц фоновых и загрязнённых территорий. Можно предположить непосредственное влияние токсичных металлов на организм белых куропаток. Слепой кишечник, наряду с почками и печенью, участвует в выведении поллютантов из организма [4]. Удлинение слепых отростков может быть результатом непрерывного иммунного ответа особей, живущих в загрязнённой среде обитания, где распространён контакт с различными токсикантами [23]. При этом содержание тяжёлых металлов в организме белой куропатки на импактных территориях на севере Красноярского края соответствует аналогичным показателям тетеревиных птиц загрязнённых местообитаний других регионов и существенно выше фоновых значений [1, 4, 11, 14, 24–30]. Корреляционный анализ содержания микроэлементов в мышечной ткани и размеров слепого отдела кишечника не выявил статистически подтверждённой зависимости. Однако следует учитывать, что мышечная ткань не является накопителем кадмия или свинца, а отобрать пробы печени, почек или костной ткани нам, к сожалению, не удалось.

Загрязнение кормовых объектов свинцом, кадмием и другими токсичными металлами связывают с атмосферным переносом их соединений техногенного происхождения на значительные расстояния [31, 32]. Повышенное содержание кадмия в органах и тканях белой куропатки обусловлено высокой концентрацией его в кормовых растениях, главным образом в побегах и почках ивы (*Salix* sp.), служащей важнейшим зимним кормом этих птиц. Ива обладает способностью накапливать кадмий, и его содержание может быть в 10–100 раз выше, чем в других кормовых растениях куропаток [33–36].

Высокие уровни кадмия в крови птиц в первую очередь связаны с изменениями концентраций жирных кислот и соединений, считающихся растительными метаболитами. Воздействие кадмия ухудшает липидный обмен, что связано со снижением концентрации липидов и жирных кислот, изменением состава фосфолипидов в клеточных мембранах и несомненно сказывается на деятельности пищеварительной системы, особенно в зимний период [37–44].

Предполагается, что загрязнение кадмием и другими металлами оказывает наибольшее негативное воздействие на взрослых самок белой куропатки по сравнению с самцами и молодым [25, 45]. Однако в нашем случае половых различий в параметрах слепого отдела кишечника выявлено не было.

Различия в длине слепого кишечника были выявлены у крякв (*Anas platyrhynchos*), обитавших в городских условиях и дикой природе в Новой Зеландии. Достоверно большую длину слепых кишок у городских крякв авторы объясняли активизацией иммунитета, наличием специфических кормов и, возможно, техногенным загрязнением [46].

Опосредованное воздействие на морфометрические параметры кишечника может быть также связано с различием видового состава и соотношения кормовых объектов на фоновых и загрязнённых территориях. Предполагается, что размер слепого кишечника зависит от состава потребляемых кормов и связан с продолжительностью пребывания птиц под снегом, определяемой суровостью и длительностью зимы. В летний период длина

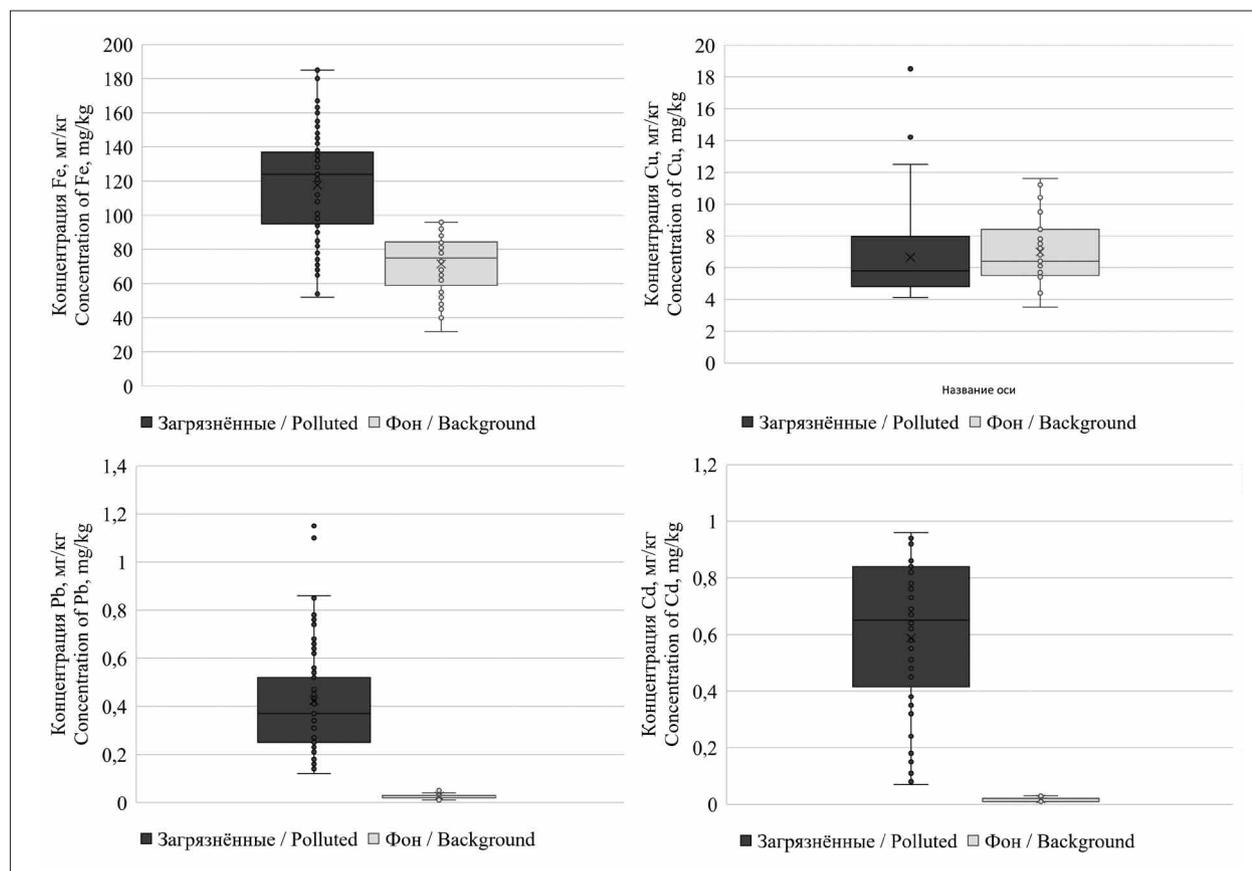


Рис. 2. Концентрация микроэлементов (мг/кг, н. в.) в скелетной мускулатуре белых куропаток на фоновых (n=45) и загрязнённых (n=99) территориях Красноярского края
 Fig. 2. Trace element concentration (mg/kg, w. w.) in the willow ptarmigan breast muscles in background (n=45) and polluted (n=99) areas of Krasnoyarsk Region

Таблица 2 / Table 2

Средняя длина слепого отдела кишечника белой куропатки разных регионов мира
Willow ptarmigan cecum average length in different regions of the world

Пол Sex	Возраст Age	n	Длина, мм Length, mm	Место Area	Источник Reference
♂	ad	95	1007	Красноярский край Krasnoyarsk region	наши данные our data
♀	ad	90	1005	Красноярский край Krasnoyarsk region	наши данные our data
♂	–	11	1290	Кольский полуостров Kola Peninsula	[15]
♀	ad	8	1320	Кольский полуостров Kola Peninsula	[15]
♀,♂	ad	12	1198	Колыма / Kolyma	[3]
♂	ad	62	1297	Северная Финляндия Northern Finland	[16]
♂	sad	81	1312	Северная Финляндия Northern Finland	[16]
♀	ad	46	1271	Северная Финляндия Northern Finland	[16]
♀	sad	93	1245	Северная Финляндия Northern Finland	[16]
♀,♂	ad	6	940	Аляска / Alaska	[17]
♀,♂	ad	–	940	усреднённый по данным публикаций averaged from publication data	[18]
♀,♂	–	69	1056	Аляска / Alaska	[19]
♂	ad	29	1440	Шотландия* / Scotland*	[19]
♀,♂	–	–	840	Англия* / England*	[20]
♂	ad	18	1355	Лапландия / Lapland	[21]
♀	ad	10	1236	Лапландия / Lapland	[21]

Примечание: ad – старше одного года, sad – до одного года, прочерк означает отсутствие данных, * – *Lagopus lagopus scotica*. / Note: ad – over one year old, sad – up to one year, a dash means no data, * – *Lagopus lagopus scotica*.

слепого отдела кишечника уменьшается [2]. Общая длина слепого отдела кишечника белой куропатки в Лапландии [21] и Норвегии [47] уменьшалась с апреля по май до минимального значения в июне-июле и снова увеличивалась до того же зимнего максимума. Эта тенденция не зависела от возраста или пола. По мнению авторов, длина слепого кишечника зависит в основном от доли в питании грубой пищи [21]. В экспериментах на граусе (*Lagopus lagopus scotica*) показано, что длина кишечника, и особенно его слепого отдела, может изменяться нелинейно, увеличиваясь с возрастанием доли клетчатки в рационе [48, 49]. В нашем случае сезон отбора проб и места обитания птиц на фоновых и загрязнённых участках были сходны, однако углублённый анализ питания не производился.

Обнаружено, что слепая кишка у белых куропаток более чем на 30% длиннее зимой, чем летом [21]. Время, необходимое для адаптации слепой кишки, не определено. По разным данным [10], слепой кишке ку-

рообразных требуется от двух до трёх месяцев, чтобы адаптироваться к новой диете, однако у цыплят-бройлеров такие изменения могли происходить всего через две-три недели после изменения рациона.

Популяция симбионтной микрофлоры может играть значительную роль в поддержании здоровья птиц [50]. Слепой кишечник птиц, как многоцелевой орган, имеет наибольшее бактериальное биоразнообразие и обилие микрофлоры по сравнению с другими отделами ЖКТ и связан с жизненно важными функциями в поддержании физиологического и поведенческого гомеостаза. Экспериментальные данные показывают, что модуляция микробиоты кишечника может влиять не только на физиологический гомеостаз хозяина, но и на его поведенческие характеристики [51]. Показана весьма значимая корреляция между микробным составом слепой кишки и эффективностью энергетического обмена у отдельных птиц [52].

При этом состав и обилие симбионтной микрофлоры в значительной степени свя-

заны с условиями среды. Видовой состав, количество и распределение кишечных микроорганизмов у содержащихся в неволе белых куропаток были сходны с таковыми показателями у домашних кур и существенно отличались от аналогичных параметров диких куропаток [53]. Дикие и содержащиеся в зоопарке тундряные куропатки (*Lagopus muta*) в Японии также имели существенные различия в составе микрофлоры, в то время как у диких птиц из нескольких местообитаний разница была не столь велика [54]. Обилие бактерий и метаногенных архей было выше у диких тундряных куропаток по сравнению с птицами, содержащимися в неволе, в то время как не было выявлено фенотипических различий в микробиоте слепого кишечника диких куропаток в материковой части Норвегии и на Шпицбергене, что также связывают с различиями в питании [55].

Тяжёлые металлы могут оказывать существенное воздействие на состав микробиоты кишечника, который варьирует в зависимости от типа токсиканта, дозы и продолжительности воздействия [56–62]. Влияние токсичных металлов на симбионтную микрофлору домашних кур было тщательно изучено [63, 64], однако мало что известно о влиянии тяжёлых металлов из окружающей среды на микробиоту кишечника диких птиц и их общее состояние здоровья. Снижение разнообразия микробиоты под воздействием свинца, кадмия, меди и цинка тесно связано с повышенным риском поражения патогенами и уменьшением способности к перевариванию и усвоению питательных веществ, что может представлять существенную угрозу для здоровья птиц [62, 65].

В экспериментах на мускусных утках (*Cairina moschata*) показано негативное влияние загрязнения свинцом кормовых объектов на состав микрофлоры кишечника. Анализ микробиоты показал корреляцию между концентрацией свинца в крови и обилием Lachnospiraceae и Ruminococcaceae, что предполагает влияние этого элемента на липидный обмен веществ [66]. У красных куропаток (*Alectoris rufa*) воздействие свинца увеличивало количество неколиформных и уменьшало количество колиформных грамотрицательных кишечных бактерий [67].

Нельзя исключать, что влияние загрязнённых кормов на активность, состав и обилие кишечных микроорганизмов белой куропатки могло сопровождаться некоторым изменением линейных размеров слепого отдела кишечника.

Выводы

Получены новые данные по морфометрическим параметрам кишечного тракта белой куропатки на севере Красноярского края. Длина слепого отдела кишечника у птиц исследуемой территории была в пределах видовой изменчивости и достоверно выше на участках, подверженных загрязнению соединениями тяжёлых металлов. Посредством однофакторного дисперсионного анализа выявлено достоверное ($p=0,01$) влияние фактора загрязнённости территории на длину слепого отдела кишечника у белой куропатки.

Содержание свинца, кадмия и железа в скелетной мускулатуре белых куропаток оказалось достоверно выше на импактных полигонах по сравнению с фоновыми участками. Коэффициенты корреляции между концентрацией свинца, кадмия, железа и меди и длиной слепого отдела кишечника оказались не достоверны, что, вероятно, связано с тем, что мышечная ткань, в отличие от печени, почек и костей, не является концентратором микроэлементов.

Причинами различий параметров слепого кишечника на импактных и фоновых территориях могут быть как непосредственное влияние токсичных элементов на организм птиц, так и различие в качественных параметрах корма либо воздействие загрязнённых кормов на обилие и состав симбионтной микрофлоры. Необходимы дальнейшие исследования рассматриваемого вопроса.

Собранные сведения могут быть использованы для экологического мониторинга территорий исследований в ближайшей и отдалённой перспективе, тем более что уровень техногенной нагрузки на севере Красноярского края остаётся высоким [32].

В районах Крайнего Севера белые куропатки являются важным объектом любительской и промысловой охоты. Показано, что потребление в пищу загрязнённой продукции белых куропаток может оказывать негативное влияние на состояние здоровья инуитов и эскимосов на севере Канады [27, 68]. В промышленных районах севера Красноярского края мясо и внутренние органы белых куропаток, употребляемые населением в пищу в большом количестве, могут представлять опасность из-за загрязнения кадмием, свинцом и другими поллютантами, существенно превышающими допустимые концентрации для пищевой продукции.

Работа выполнена на базе ФГБУПБЗ «Центральносибирский» и ФГБНУ «Всероссийский

научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова» в рамках Государственного задания по Программе ФНИ государственных академий наук на 2021–2024 гг. (код темы FNWS-2022-0001).

References

1. Wren C.D., Nygård T., Steinnes E. Willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) as a biomonitor of environmental metal levels in Norway // Environ. Pollut. 1994. V. 85. No. 3. P. 291–295. doi: 10.1016/0269-7491(94)90050-7
2. Potapov R.L. Order Galliformes. Family Tetraonidae. Leningrad: Nauka, 1985. 638 p. (in Russian).
3. Andreev A.V. Bird adaptation to winter conditions in the Subarctic. Moskva: Nauka, 1980. 176 p. (in Russian).
4. Kochkarev P.V. The role of the ptarmigan (*Lagopus lagopus* Montin. 1776) caecum in the regulation process of microelement structure // Bulletin of KrasGAU. 2014. No.10. P. 122–126 (in Russian).
5. McBee R., West G.C. Cecal fermentation in the willow ptarmigan // The Condor. 1969. V. 71. No. 1. P. 54–58. doi: 10.2307/1366048
6. Newman J., Maurer M., Forbey J.S.; Brittas R., Johansson Ö., Nielsen Ó.K., Willerbrand T., Kohl K.D. Low activities of digestive enzymes in the guts of herbivorous grouse (Aves: Tetraoninae) // J. Ornithol. 2021. V. 162. No. 2. P. 477–485. doi: 10.1007/s10336-020-01835-z
7. Johnsen S. Remarks on the Svalbard ptarmigan (*Lagopus mutus hyperboreus* Sundev.) // Bergens Mus. Årbok. Naturviteskapelig Række. 1941. No. 8. P. 1–29.
8. Mortensen A., Tindall A.R. Caecal decomposition of uric acid in captive and free ranging willow ptarmigan (*Lagopus lagopus lagopus*) // Acta Physiol. Scand. 1981. V. 111. No.2. P. 129–133. doi: 10.1111/j.1748-1716.1981.tb06715.x
9. Mortensen A., Tindall A.R. Utilisation of dietary amino acids by grouse (*Lagopus lagopus*) // Acta Physiol. Scand. 1978. V. 102. No. 1. 80A.
10. Svihus B., Choct M., Classen H.L. Function and nutritional roles of the avian caeca: a review // World's Poult. Sci. J. 2013. V. 69. No. 2. P. 249–264. doi: 10.1017/S0043933913000287
11. Ermolov Yu.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolpashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolentsev N.B. Accumulation of chemical elements in the biogeochemical food chain of the northern Norilsk plateau // Geochemistry International. 2020. V. 65. No. 5. P. 499–510 (in Russian). doi: 10.31857/S0016752520040032
12. Ivanter E.V., Korosov A.V. Elementary biometrics. Petrozavodsk: PetrGU, 2005. 104 p. (in Russian).
13. Borovikov V. Statistica: the art of computer data analysis. For professionals. Sankt-Peterburg: Piter, 2001. 656 p. (in Russian).
14. Kochkarev P.V., Perevozchikova M.A., Sergeev A.A., Shiryaev V.V., Piminov V.N. Toxic and biogenic elements in the organs and tissues of the willow ptarmigan (*Lagopus lagopus* L., 1758) in the north of the Krasnoyarsk Region (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 3. P. 54–63 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-054-063
15. Semenov-Tyan-Shansky O.I. Ecology of grouse birds. Moskva, 1959. 319 p. (in Russian).
16. Pulliainen E. Small intestine and caeca lengths in the willow grouse (*Lagopus lagopus*) in Finnish Lapland // Ann. Zool. Fennici. 1976. V. 13. No. 4. P. 195–199.
17. Leopold A.S. Intestinal morphology of gallinaceous birds in relation to food habits // J. Wild. Manage. 1953. V. 17. No. 2. P. 197–203. doi: 10.2307/3796715
18. DeGolier T.F., Mahoney S.A., Duke G.E. Relationships of avian cecal lengths to food habits, taxonomic position, and intestinal lengths // The Condor. 1999. V. 101. No. 3. P. 622–634. doi: 10.2307/1370192
19. Moss R. Winter diets, gut lengths, and interspecific competition in Alaskan ptarmigan // The Auk. 1974. V. 91. No. 4. P. 737–746. doi: 10.2307/4084726
20. Wilson E.A. The food of the red grouse // The grouse in health and in disease / Ed. A.S. Leslie. London: Smith, Elder & Co, 1911. P. 79–112.
21. Pulliainen E., Tunkkari P. Seasonal changes in the gut length of the willow grouse (*Lagopus lagopus*) in Finnish Lapland // Ann. Zool. Fennici. 1983. V. 20. No. 1. P. 53–56.
22. Battley P.F., Piersma T. Adaptive interplay between feeding ecology and features of the digestive tract in birds // Physiological and Ecological Adaptations to Feeding in Vertebrates / Eds. J.M. Stark, T. Wang. Enfield, New Hampshire: Science Publishers, 2005. P. 201–228.
23. Clench M.H., Mathias J.R. The avian cecum: a review // Wilson Bull. 1995. V. 107. No. 1. P. 93–121.
24. Kålås J.A., Ringsby T.H., Lierhagen S. Metals and radiocesium in wild animals from the Sør-Varanger area, North Norway // NINA Oppdragsmelding. 1993. V. 212. 26 p.
25. Pedersen H.C., Myklebust I. Age-dependent accumulation of cadmium and zinc in the liver and kidneys of Norwegian willow ptarmigan // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1993. V. 51. No. 3. P. 381–388. doi: 10.1007/BF00201756
26. Kålås J.A., Ringsby T.H., Lierhagen S. Metals and selenium in wild animals from Norwegian areas close to Russian nickel smelters // Environ. Monit. Assess. 1995. V. 36. No. 3. P. 251–270. doi: 10.1007/BF00547905
27. Rodrigue J., Champoux L., Leclair D., Duchesne J.F. Cadmium concentrations in tissues of willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) and rock ptarmigan (*Lagopus muta*) in Nunavik, Northern Québec // Environ. Pollut. 2007. V. 147. No. 3. P. 642–647. doi: 10.1016/j.envpol.2006.10.017
28. Pedersen H.C., Lorås A., Andersen R.A., Jenssen B.M. Behavioural effects of cadmium (Cd) in free-living willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) // Eur. J. Wildl. Res. 2010. V. 56. P. 141–150. doi: 10.1007/s10344-009-0295-y

29. Rodrigue J., McNicoll R., Leclair D., Duchesne J.F. Lead concentrations in ruffed grouse, rock ptarmigan, and willow ptarmigan in Québec // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2005. V. 49. No. 1. P. 97–104. doi: 10.1007/s00244-003-0265-4
30. Petrova E.M. Research of the content of heavy metals in the muscle tissue of (*Tetraoninae Vigors*, 1825) in different ecological zones of the Republic of Sakha (Yakutia) // Vestnik IrGSHA. 2020. No. 101. P. 82–87 (in Russian). doi: 10.51215/1999-3765-2020-101-82-87
31. Gbangou T., Colette A. Long-term trends of air pollutants at European and national level 2005–2021. ETC HE Report 2023/8 [Internet resource] <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2023-8-long-term-trends-of-air-pollutants-at-european-and-national-level-2005-2021> (Accessed: 16.12.2024).
32. On the state and protection of the environment in Krasnoyarsk Krai in 2023: State report. Krasnoyarsk, 2024. 386 p. (in Russian) [Internet resource] http://www.mpr.krskstate.ru/dat/bin/art_attach/28086_2024.06.28.pdf (Accessed: 16.12.2024).
33. Myklebust I., Nybø S., Kålås J.A., Pedersen H.C. Cadmium accumulation in willow ptarmigan (*Lagopus L. lagopus*) and rock ptarmigan (*L. mutus*) in Central Norway // Sci. Total Environ. 1993. V. 134. Suppl. 1. P. 135–139. doi: 10.1016/S0048-9697(05)80012-9
34. Myklebust I., Pedersen H.C. Accumulation and distribution of cadmium in willow ptarmigan // Ecotoxicol. 1999. V. 8. P. 457–465. doi: 10.1023/A:1008912003597
35. Larison J.R., Likens G.E., Fitzpatrick J.W., Crock J.G. Cadmium toxicity among wildlife in the Colorado Rocky Mountains // Nature. 2000. V. 406. No. 6792. P. 181–183. doi: 10.1038/35018068
36. Pedersen H.C., Fossøy F., Kålås J.A., Lierhagen S. Accumulation of heavy metals in circumpolar willow ptarmigan (*Lagopus l. lagopus*) populations // Sci. Total Environ. 2006. V. 371. No. 1–3. P. 176–189. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.09.005
37. Butler P.J. The physiological basis of bird flight // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2016. V. 371. No. 1704. Article No. 20150384. doi: 10.1098/rstb.2015.0384
38. Sunshine H., Iruela-Arispe M.L. Membrane lipids and cell signaling // Curr. Opin. Lipidol. 2017. V. 28. No. 5. P. 408–413. doi: 10.1097/MOL.0000000000000443
39. Olszowski T., Gutowska I., Baranowska-Bosiacka I., Lukomska A., Drozd A., Chlubek D. Cadmium alters the concentration of fatty acids in THP-1 macrophages // Biol. Trace Elem. Res. 2018. V. 182. No. 1. P. 29–36. doi: 10.1007/s12011-017-1071-6
40. Liao K., Ran Z., Meng R., Xu J., Cao J., Xu X., Wang Y., Xu S., Yan X. Long-chain polyunsaturated fatty acid biosynthesis and its response to cadmium exposure in silver pomfret // Aquat. Toxicol. 2019. V. 206. P. 61–71. doi: 10.1016/j.aquatox.2018.11.002
41. Zoidis E., Papadomichelakis G., Pappas A.C., Theodorou G., Fegeros K. Effects of selenium and cadmium on breast muscle fatty-acid composition and gene expression of liver antioxidant proteins in broilers // Antioxidants. 2019. V. 8. No. 5. Article No. 147. doi: 10.3390/antiox8050147
42. Chwastek G., Surma M.A., Rizk S., Grosser D., Lavrynenko O., Rucińska M., Jambor H., Sáenz J. Principles of membrane adaptation revealed through environmentally induced bacterial lipidome remodeling // Cell Rep. 2020. V. 32. No. 12. Article No. 108165. doi: 10.1016/j.celrep.2020.108165
43. Jensen K.J., Isaksson C., Eikenaar C., Andersson M.N. Migrant blackbirds, *Turdus merula*, have higher plasma levels of polyunsaturated fatty acids compared to residents, but not enhanced fatty acid unsaturation index // Ecol. Evol. 2020. V. 10. No. 18. P. 10196–10206. doi: 10.1002/ece3.6681
44. Jensen M., Poulsen R., Langebæk R., Jenssen B.M., Moe J., Ciesielski T.M., Dietz R., Sonne C., Madsen J., Hansen M. The metabolome of pink-footed goose: Heavy metals and lipid metabolism // Environ. Res. 2023. V. 231. Pt. 1. Article No. 116043. doi: 10.1016/j.envres.2023.116043
45. Hoffman R.W. White-tailed Ptarmigan (*Lagopus leucura*): a technical conservation assessment. USDA Forest Service, 2006. 72 p. [Internet resource] <https://sccp.ca/sites/default/files/species-habitat/documents/white-tailedptarmigan%20conservation%20assessment%20usfws%202006.pdf> (Accessed: 18.09.2024).
46. Jarman T.E., Gartrell B.D., Battley P.F. Differences in body composition between urban and rural Mallards, *Anas platyrhynchos* // J. Urban Ecol. 2020. V. 6. No. 1. Article No. juaa011. doi: 10.1093/jue/juaa011
47. Hanssen I. Micromorphological studies on the small intestine and caeca in wild and captive willow grouse (*Lagopus lagopus lagopus*) // Acta Vet. Scand. 1979. V. 20. No. 3. P. 351–364. doi: 10.1186/BF03546597
48. Moss R. Effects of captivity on gut lengths in red grouse // J. Wildl. Manage. 1972. V. 36. P. 99–104. doi: 10.2307/3799192
49. Moss R. Gut size and the digestion of fibrous diets by tetraonid birds // J. Exp. Zool. Suppl. 1989. No. 3. P. 61–65. doi: 10.1002/jez.1402520510
50. Dunkley K.D., Callaway T.R., Chalova V.I., McReynolds J.L., Hume M.E., Dunkley C.S., Kubena L.F., Nisbet D.J., Ricke S.C. Foodborne *Salmonella* ecology in the avian gastrointestinal tract // Anaerobe. 2009. V. 15. No. 1–2. P. 26–35. doi: 10.1016/j.anaerobe.2008.05
51. Fu Y., Hu J., Erasmus M.A., Zhang H., Johnson T.A., Cheng H. Cecal microbiota transplantation: unique influence of cecal microbiota from divergently selected inbred donor lines on cecal microbial profile, serotonergic activity, and aggressive behavior of recipient chickens // J. Anim. Sci. Biotechnol. 2023. V. 14. No. 1. Article No. 66. doi: 10.1186/s40104-023-00866-9
52. Bedford M.R., Apajalahti J.H. The role of feed enzymes in maintaining poultry intestinal health //

- J. Sci. Food Agric. 2022. V. 102. No. 5. P. 1759–1770. doi: 10.1002/jsfa.11670
53. Hanssen I. A comparison of the microbiological conditions in the small intestine and caeca of wild and captive willow grouse (*Lagopus lagopus lagopus*) // Acta Vet. Scand. 1979. V. 20. No. 3. P. 365–371. doi: 10.1186/BF03546598
54. Ueda A., Kobayashi A., Tsuchida S., Yamada T., Murata K., Nakamura H., Ushida K. Cecal microbiome analyses on wild Japanese rock ptarmigans (*Lagopus muta japonica*) reveals high level of coexistence of lactic acid bacteria and lactate-utilizing bacteria // Microorganisms. 2018. V. 6. No. 3. Article No. 77. doi: 10.3390/microorganisms6030077
55. Salgado-Flores A., Tveit A.T., Wright A-D., Pope P.B., Sundset M.A. Characterization of the cecum microbiome from wild and captive rock ptarmigans indigenous to Arctic Norway // PLoS One. 2019. V. 14. No. 3. Article No. e0213503. doi: 10.1371/journal.pone.0213503
56. Gao B., Chi L., Mahbub R., Bian X., Tu P., Ru H., Lu K. Multi-omics reveals that lead exposure disturbs gut microbiome development, key metabolites, and metabolic pathways // Chem. Res. Toxicol. 2017. V. 30. No. 4. P. 996–1005. doi: 10.1021/acs.chemrestox.6b00401
57. Xia J., Jin C., Pan Z., Sun L., Fu Z., Jin Y. Chronic exposure to low concentrations of lead induces metabolic disorder and dysbiosis of the gut microbiota in mice // Sci. Total Environ. 2018. V. 631–632. P. 439–448. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.053
58. Li X., Brejnrod A.D., Ernst M., Rykær M., Herschend J., Olsen N.M.C., Dorrestein P.C., Rensing C., Sørensen S.J. Heavy metals exposure causes changes in the metabolic health-associated gut microbiome and metabolites // Environ. Int. 2019. V. 126. P. 454–467. doi: 10.1016/j.envint.2019.02.048
59. Assefa S., Köhler G. Intestinal microbiome and metal toxicity // Curr. Opin. Toxicol. 2020. V. 19. P. 21–27. doi: 10.1016/j.cotox.2019.09.009
60. Duan H., Yu L., Tian F., Zhai Q., Fan L., Chen W. Gut microbiota: a target for heavy metals toxicity and a probiotic protective strategy // Sci. Total Environ. 2020. V. 742. Article No. 140429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140429
61. Arun K.B., Madhavan A., Sindhu R., Emmanuel S., Binod P., Pugazhendhi A., Sirohi R., Reshmy R., Awasthi M.K., Gnansounou E., Pandey A. Probiotics and gut microbiome – Prospects and challenges in remediating heavy metals toxicity // J. Hazard. Mater. 2021. V. 420. Article No. 126676. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126676
62. Zhang S., Shen Y., Wang S., Lin Z., Su R., Jin F., Zhang Y. Responses of the gut microbiota to environmental heavy metal pollution in tree sparrow (*Passer montanus*) nestlings // Ecotoxicol Environ Saf. 2023. V. 264. Article No. 115480. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115480
63. Zhou C., Xu P., Huang C., Liu G., Chen S., Hu G., Li G., Liu P., Guo X. Effects of subchronic exposure of mercuric chloride on intestinal histology and microbiota in the cecum of chicken // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2020. V. 188. Article No. 109920. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109920
64. Huang C., Shi Y., Zhou C., Guo L., Liu G., Zhuang Y., Li G., Hu G., Liu P., Guo X. Effects of subchronic copper poisoning on cecal histology and its microflora in chickens // Front. Microbiol. 2021. V. 12. Article No. 739577. doi: 10.3389/fmicb.2021.739577
65. Yu C., Xu N., Tao X., Liu G. Chronic lead poisoning-induced budgerigar liver damage, gut microbiota dysbiosis, and metabolic disorder // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2024. V. 278. Article No. 116388. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116388
66. Sato H., Ishii C., Nakayama S.M.M., Ichise T., Saito K., Watanabe Y., Ogasawara K., Torimoto R., Kobayashi A., Kimura T., Nakamura Y., Yamagishi J., Ikenaka Y., Ishizuka M. Behavior and toxic effects of Pb in a waterfowl model with oral exposure to Pb shots: Investigating Pb exposure in wild birds // Environ. Pollut. 2022. V. 308. Article No. 119580. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119580
67. Vallverdú-Coll N., Ortiz-Santaliestra M.E., Mougeot F., Vidal D., Mateo R. Sublethal Pb exposure produces season-dependent effects on immune response, oxidative balance and investment in carotenoid-based coloration in red-legged partridges // Environ. Sci. Technol. 2015. V. 49. No. 6. P. 3839–3850. doi: 10.1021/es505148d
68. Bjørnsen M., Valerón N.R., Vásquez D.P., Velasco D., Hansen E., Hauptmann A.L. Microbiota in the ptarmigan intestine – an Inuit delicacy and its potential in popular cuisine // PLoS One. 2024. V. 19. No. 12. Article No. e0305317. doi: 10.1371/journal.pone.0305317

Состояние древостоев среднетаёжных ельников черничных на автоморфных почвах в зоне воздействия аэротехногенного загрязнения лесопромышленного комплекса (Республика Коми)

© 2025. А. В. Манов, к. с.-х. н., н. с., Е. А. Робакидзе, к. б. н., н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: manov@ib.komisc.ru

Проведена оценка влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства на состояние еловых древостоев. По динамике радиального прироста стволовой древесины ели выявлена направленность развития древостоев при длительном техногенном воздействии. Объектами исследования являются старовозрастные ельники черничные, расположенные на удалении 4, 5, 11, 24, 50 км от источников эмиссии по направлению преобладающих ветров. По наблюдениям на пробных площадях выполнен анализ жизнеспособности древостоев ельников, основанный на визуальной оценке состояния деревьев по характеристике кроны. Древостои ельников относятся к категории «здоровые» с начальной стадией ослабления, которая немного усиливается в сторону уменьшения расстояния до дымовых труб предприятия. Методами дендрохроноиндикации выполнена оценка воздействия аэротехногенных выбросов от целлюлозно-бумажного производства на радиальный прирост стволовой древесины деревьев ели. Материалом изучения послужили образцы древесины (керы), отобранные со стволов старовозрастных деревьев ели в пределах пробных площадей. Обнаружено увеличение радиального прироста ели в импактной зоне. На расстояниях более 11 км от источника аэрополлютантов прирост стволовой древесины ели остаётся относительно стабильным на всём протяжении времени функционирования производства.

Ключевые слова: жизненное состояние, повреждённость, дендрохроноиндикация, аэротехногенное загрязнение, целлюлозно-бумажное производство, радиальный прирост стволовой древесины, ельники черничные, средняя тайга.

The condition of tree stands in middle taiga *Piceetum myrtillosum* on automorphic soils in the plots affecting by aerotechnogenic pollution from the timber industry complex (the Komi Republic)

© 2025. A. V. Manov ORCID: 0000-0002-5070-0078[†]

E. A. Robakidze ORCID: 0000-0003-3395-3767[†]

Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: manov@ib.komisc.ru

The authors accessed the effect of aerotechnogenic emissions from the pulp-and-paper plant of the Syktyvkar timber industry complex on the condition of spruce stands. Carbon monoxide, nitrogen dioxide, inorganic dust, hydrogen sulfide, sulfur dioxide and mercaptans are the main pollutants. By the radial growth dynamics of spruce stem wood we identified the development trend of forest stands affected by the long-term technogenic impact. The old-growth blueberry spruce forests located at distances of 4, 5, 11, 24, 50 km from the emission source in the direction of prevailing winds were studied. The vitality of spruce forest stands has been analyzed via visual evaluation of tree crowns at the sample plots. The studied spruce stands are 'healthy' with initial weakening signs which slightly intensify towards the discharge chimneys of the enterprise. The impact of aerotechnogenic emissions from pulp-and-paper production on the radial increment of spruce stem wood was assessed by the tree-ring indication methods. The study by this methods has utilized wood samples (cores) taken from trunks of old-growth spruce trees within sample plots. Finally, we have identified the increased radial growth of spruce in the impact zone. At distances longer than 11 km from the air pollution source, the radial growth of spruce stem wood resists relatively stable from the very beginning of the timber industry enterprise (from 1969 to the present). The increase in radial growth of spruce trees is associated to the time when the enterprise attained its installed capacity in the late 1980s. This was followed by a long-time decrease in radial growth of trees. This period is character-

ized by a production decline due to the deterioration of the financial situation in Russia during the 1990s and production modernization from 2008 to 2018 which reduced gas and dust emissions of the enterprise.

Keywords: life condition, destruction, tree-ring indication, aerotechnogenic pollution, pulp and paper production, stem wood radial growth, *Piceetum myrtillosum*, middle taiga.

В районах с высокой лесистостью территории большую нагрузку аэротехногенного загрязнения окружающей среды принимает на себя лесной покров. Лесные экосистемы выступают естественным фильтром загрязняющих веществ на биосферном уровне, вовлекая их в биогеохимические циклы [1]. Постоянно испытывающая промышленный (техногенный) пресс лесная растительность требует вовлечения новых способов оценки её состояния. Методы дендроиндикации в отличие от химико-аналитических позволяют определить влияние вредных веществ на растения и численно оценить длительность и силу реакции их на влияние сразу всех токсикантов.

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), являясь долгоживущим и отзывчивым на изменения внешних условий древесным растением, хорошо подходит для древесно-кольцевого анализа [2]. Она доминирует в лесах на территории Республики Коми и распространена во всех подзонах тайги [3]. Ельники черничные являются довольно распространёнными лесорастительными ассоциациями средней тайги [4, 5]. Здесь они формируют, как правило, смешанные по составу, разновозрастные древостои. Спелые и перестойные еловые насаждения подвержены интенсивной лесозексплуатации [6].

Известно, что на прирост древесных растений, не находящихся в очагах болезней и вредителей леса, влияют в основном климатические показатели – температура и осадки. Со стремительным развитием промышленности в последнее время добавился новый фактор – поллютанты, которые вызывают снижение продуктивности лесных фитоценозов. Однако в ряде случаев реакция древесных растений оказывается положительной на некоторые условия повышенного загрязнения [7–10].

Мониторинг лесов представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза состояния и динамики лесного фонда (ст. 69 Лесного кодекса Российской Федерации). При его реализации в ряде случаев возникает необходимость определять жизненное состояние древостоев. Понятия «жизненное состояние» или «жизненность» (дерева, древостоя) нами трактуется как параметр морфометрических

признаков роста и развития древесных растений в момент наблюдения за ними.

Цель данной работы – оценка современного состояния древостоев и выявление динамики радиального прироста деревьев ели, произрастающих в среднетаёжных ельниках черничных на разном удалении от источников аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – среднетаёжные ельники черничные, занимающие плоские пространства в рельефе местности Мезенско-Вычегодской равнины, расположенные на землях лесного фонда Республики Коми. Они развиваются на типичных подзолистых почвах, формируют смешанные по составу и сложные по строению разновозрастные древостои [5, 11]. Краткая таксационная характеристика данных объектов приведена в таблице 1.

Крупным источником загрязнения атмосферы в районе исследования является Сыктывкарский лесопромышленный комплекс (СЛПК), выпустивший первую продукцию – целлюлозу и картон в 1969 г. В конце 1980-х гг. он вышел к освоению установленных мощностей. В 1966 г. для нужд СЛПК введена в эксплуатацию теплоэнергоцентральный [6]. Высота дымовых труб, являющихся основными источниками выбросов, составляет от 40 до 180 м. Главными загрязнителями служат: оксид углерода, диоксид азота, неорганическая пыль, сероводород, диоксид серы и меркаптаны. Динамика объёмов загрязняющих веществ с 1995 по 2021 гг. представлена на рисунке 1. По данным экологических отчётов СЛПК (<https://www.mondigroup.com>) отмечается существенное снижение аэротехногенных выбросов за последние 20 лет, что связано с глубокой модернизацией очистных сооружений предприятия.

Климат района исследования умеренно континентальный со сравнительно долгой и многоснежной зимой. Лето короткое, умеренно тёплое. Весна и осень длительные, холодные. Обилие осадков на фоне слабого испарения ведёт к избыточной влажности климата и почвы. Световой период два летних месяца

Таблица 1 / Table 1

Таксационная характеристика древостоев ельников черничных свежих
Taxation characteristics of *Piceetum myrtillosum* stands

№ пробной площади Sample plot No.	Состав древостоя Composition of forest stands	Амплитуда возраста (средний возраст), лет Age amplitude (mean age), years	Густота, шт./га Density, trees / ha	Запас стволовой древесины, м ³ /га Stemwood standing stock, m ³ /ha	Среднее для преобладающей породы Mean for dominant tree species	
					высота, м height, m	диаметр на высоте 1,3 м, см diameter at a height of 1.3 m, cm
Импактная зона / Impact zone						
4	5ЕЗБ2С	80–200 (133)	1551	465	18	20
5	9Е1Б+Пх	80–270 (127)	1345	373	17	21
11	6Е2Б1С1Ос	80–190 (122)	1434	344	16	17
Фоновый район / Control area						
24	9Е1Б	80–180 (130)	700	282	18	20
50	7Е2Б+С, Ос ед. Пх	80–210 (125)	989	279	17	20

Примечание. Формула состава древостоя: Е – ель сибирская; С – сосна обыкновенная; Пх – пихта сибирская; Б – берёзы пушистая и повислая; Ос – осина обыкновенная. Единица коэффициента состава соответствует 10% запаса данной породы в общем запасе древостоя. Доля участия породы: «+» – 2–5%; «ед.» – < 2%. Номер пробной площади соответствует расстоянию до промышленных дымовых труб СЛПК в километрах.

Note. The formula for the forest stand composition: Е – *Picea obovata*; С – *Pinus sylvestris*; Пх – *Abies sibirica*; Б – *Betula pubescens*, *B. pendula*; Ос – *Populus tremula*. One composition coefficient unit corresponds to 10% of the given species stock in the total growing stock. The share of species: “+” – 2–5%; “ед.” – < 2%. The sample plot number corresponds to the distance to the industrial chimneys of the Syktyvkar timber industry complex in kilometers.

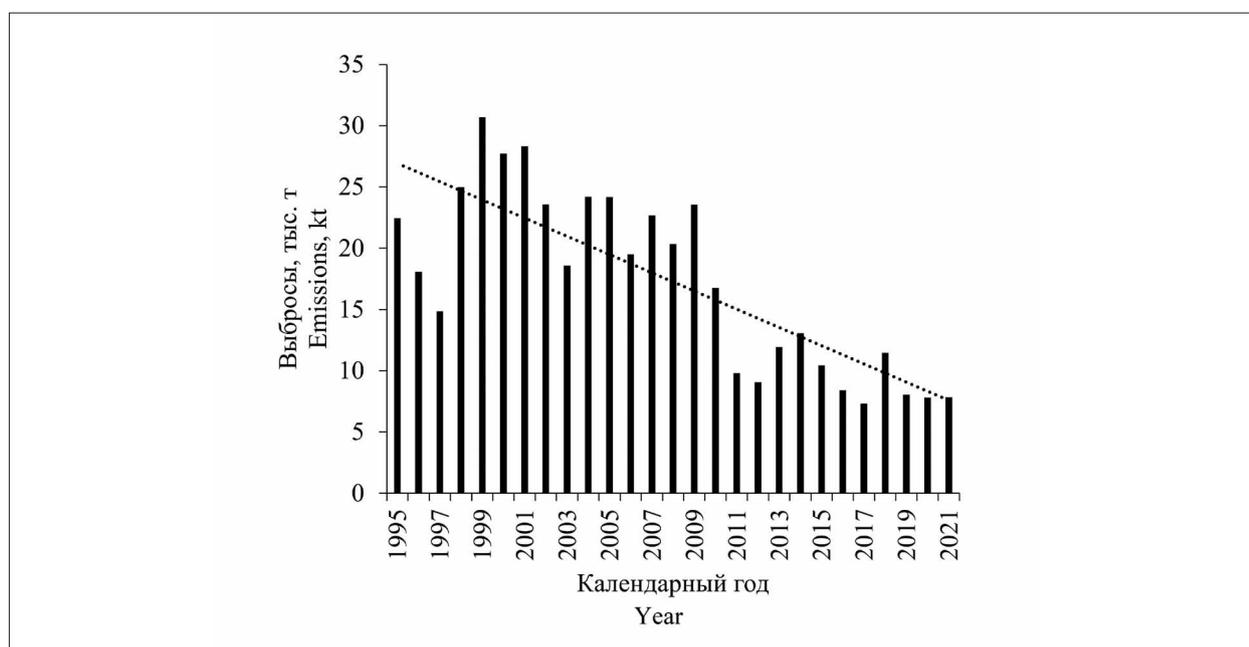


Рис. 1. Динамика объёмов выбросов загрязняющих веществ от целлюлозно-бумажного производства Сыктывкарского лесопромышленного комплекса
Fig. 1. The emission dynamics of pollutants from the pulp and paper production of the Syktyvkar timber industry complex

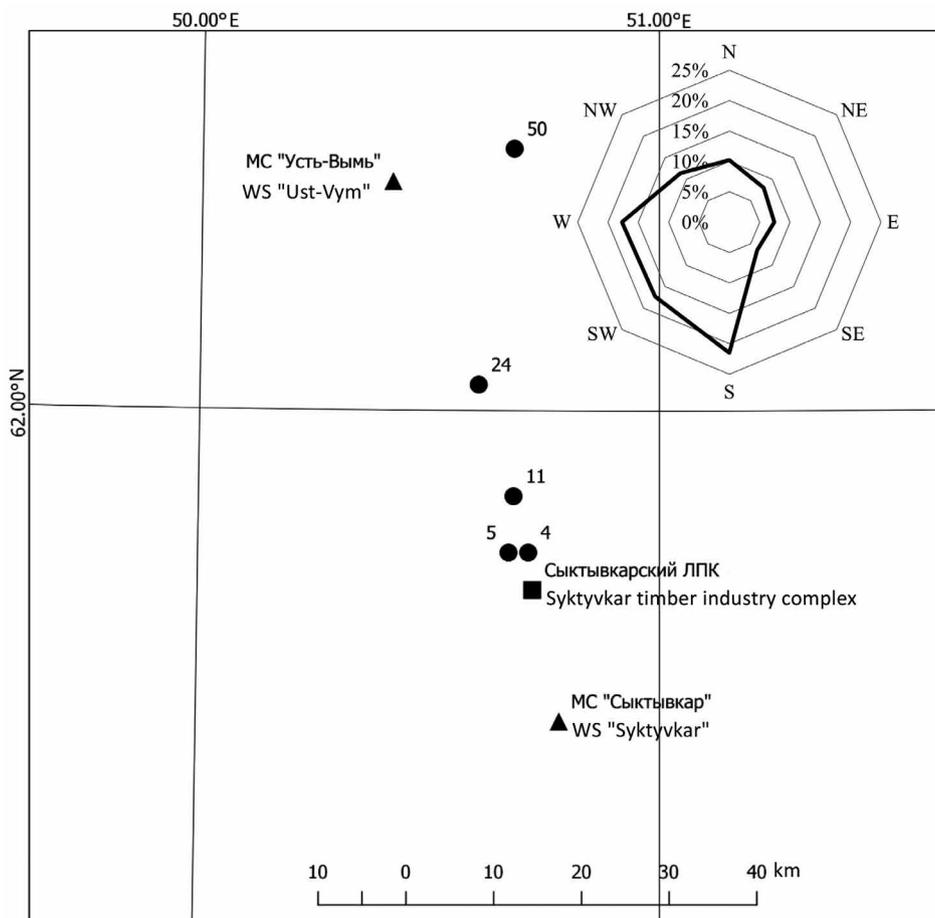


Рис. 2. Расположение объектов исследования. Условные обозначения: точки – пробные площадки; треугольники – ближайшие метеостанции (МС); квадрат – дымовые трубы СЛПК. График (роза ветров) характеризует режим ветра по многолетним наблюдениям на метеостанции «Сыктывкар»
Fig. 2. Location of the study plots. Symbols: points – forest management sample plots; triangles – nearest weather stations (WS); square – discharge chimneys of the Syktyvkar timber industry complex. The graph (wind rose) characterizes the wind regime based on the long-term observations at the Syktyvkar weather station

длится почти круглые сутки, что обуславливает увеличение суммы фотосинтетической активной радиации (ФАР), снижая перепады температуры в течение суток. Преобладают ветры южного и юго-западного направления [12].

Исследования, результаты которых вошли в рукопись данной статьи, проводились в 2020–2022 гг. в ельниках черничных на пяти пробных площадях (ПП), заложенных с учётом ОСТА 59-69-83 на разном удалении (4, 5, 11, 24, 50 км) от источника аэротехногенных выбросов по направлению преобладающих ветров (рис. 2). На каждой ПП проводился сплошной пересчёт деревьев по породе, диаметру, высоте и состоянию (здоровые, ослабленные, сильно ослабленные, отмирающие, свежий сухостой и старый сухостой – постепенно опадают ветви и кора).

Состояние древостоев среднетаёжных ельников визуально оценивали по характери-

стике кроны деревьев и соответствующим им коэффициентам жизнненности [13]. Согласно автору, коэффициент здорового дерева приравнивается к 100%, а сухостоя – к нулю. Для деревьев, относящихся к промежуточным градам, указываются коэффициенты, соответствующие их состоянию. Распространены расчёты индексов жизненного состояния древостоев по числу деревьев и объёму стволовой древесины. Вычисления относительного жизненного состояния изучаемых древостоев проводили по следующей формуле [13]:

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N, \quad (1)$$

где L_n – относительное жизненное состояние древостоя, %; n_1, n_2, n_3, n_4 – число здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев на 1 га соответственно; N – общее число деревьев за исключением

старого сухостоя на 1 га. В связи с нулевой жизненностью старого сухостоя в расчётах его не использовали, так как согласно [13] он существенно занижает показатели состояния здоровья лесов.

При показателе L_n , равном 100–80%, жизненное состояние древостоя оценивалось как «здоровое», при 79–50% – ослабленное, при 49–20% – сильно ослабленное, при 19% и ниже – древостой считается полностью разрушенным.

Кроме жизненного состояния древостоя целесообразно знать меру его повреждённости [13]:

$$D_n = (30n_2 + 60n_3 + 95n_4 + 100n_5) / N, \quad (2)$$

где D_n – повреждённость древостоя, %; n_2, n_3, n_4, n_5 – число повреждённых (ослабленных), сильно повреждённых (сильно ослабленных) и усыхающих (отмирающих), свежих сухостойных деревьев на 1 га соответственно.

При показателе D_n от 11 до 19% отмечается начальная стадия ослабления древостоя, при 20–49% древостой является повреждённым, при 50–79% – сильно повреждённым, при 80% и более – разрушенным.

Возраст деревьев определяли путём подсчёта годичных слоёв на образцах древесины (кернах), отобранных возрастным буром у комля ствола у 20–30% растений всех пород в пределах каждой ПП. Керны в дальнейшем анализировали по методам, принятым в дендрохронологии [2, 14–16]. Измерение ширины годичных колец деревьев выполняли по сканированным изображениям кернов с разрешением 2400 dpi в специализированной программе CooRecorder (<https://www.cybis.se>). Методом перекрёстной датировки при помощи программ CDendro (<https://www.cybis.se>) и COFESHA [17] произведена абсолютная датировка времени формирования слоёв радиального прироста древесины. Полученные

временные ряды радиального прироста обрабатывали при помощи пакета dplR [18] из программной среды R (<https://www.cran.r-project.org>). Они объединялись в обобщённые древесно-кольцевые хронологии для каждой ПП путём расчёта взвешенных средних. Их качество оценивали по статистическим характеристикам: коэффициенту корреляции Пирсона, среднему коэффициенту чувствительности и автокорреляции первого порядка.

Для оценки реакции радиального прироста деревьев ели на аэротехногенные загрязнения использовали только старовозрастные деревья, которые из-за своего лидирующего положения в фитосоциальном статусе древостоя имеют ослабленные конкурентные взаимоотношения с соседями, что снижает влияние как межвидовой, так и внутривидовой конкуренции на ширину годичных колец [19, 20]. Сходства и различия признаков обобщённых древесно-кольцевых хронологий ели с ПП разной удалённости от источников аэротехногенных выбросов выявляли методом одиночной связи в кластерном анализе при помощи пакета pvclust [21] из программной среды R.

Результаты и обсуждение

Экологическая структура древостоев среднетаёжных ельников в условиях разной концентрации объёмов аэровыбросов от целлюлозно-бумажного производства показала небольшое улучшение их состояния по направлению от источника загрязнения (табл. 2). При этом, согласно индексу жизненного состояния, все исследуемые древостои характеризуются как «здоровые» ($L_n > 80\%$) с признаками начальной стадии ослабления ($11 < D_n < 19\%$).

При отсутствии длительных мониторинговых данных за состоянием древостоев по динамике радиального прироста древесины

Таблица 2 / Table 2

Характеристика состояния древостоев ельников / The life condition characteristics of spruce forest stands

№ пробной площади / Sample plot No.	L_n , %	D_n , %
4	81,3	18,7
5	83	17
11	83,5	16,5
24	87,1	12,9
50	86,5	13,5

Примечание: L_n – относительное жизненное состояние древостоя, %; D_n – повреждённость древостоя, %.
 Note: L_n – relative vital state of the stand, %; D_n – stand damage, %.

Таблица 3 / Table 3

Статистические показатели древесно-кольцевых хронологий ели
Statistical indicators of spruce tree-ring chronologies

№ ПП / Sample plot No.	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>Sens</i>	<i>Ar1</i>
4	37	0,73	0,24	0,59
5	40	0,65	0,25	0,76
11	30	0,56	0,23	0,48
24	28	0,62	0,22	0,60
50	50	0,55	0,23	0,57

Примечание: *N* – число деревьев в древесно-кольцевой хронологии; *r* – средний коэффициент корреляции; *Sens* – средний коэффициент чувствительности; *Ar1* – автокорреляция первого порядка.

Note: *N* – number of trees in the tree-ring chronology; *r* – mean correlation coefficient; *Sens* – mean sensitivity coefficient; *Ar1* – first-order autocorrelation.

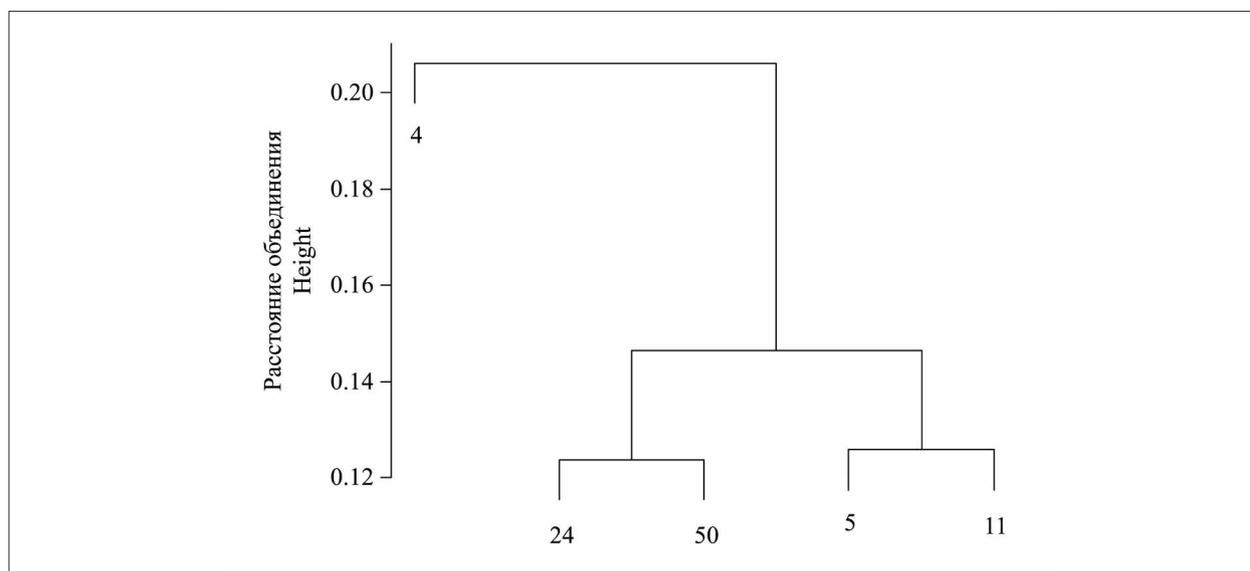


Рис. 3. Дендрограмма кластеризации обобщённых древесно-кольцевых хронологий елей для пробных площадок за период 1960–2020 гг.

Fig. 3. The clustering dendrogram of generalized tree-ring chronologies of spruce trees for sample plots for the period 1960–2020

ствола дерева можно оценить направленность их развития. Известно, что величина прироста определяется тремя главными факторами: колебанием климата, внутренней саморегуляцией и антропогенной деятельностью.

Индивидуальные временные ряды радиального прироста деревьев ели показывают достаточно высокие межсерийные корреляционные связи (*r*) и чувствительность (*Sens*) к внешним факторам среды, что позволило их объединить для каждой ПП. Высокие значения автокорреляции первого порядка (*Ar1*) свидетельствуют о влиянии условий роста предшествующих лет на ширину годичного кольца текущего года (табл. 3).

Учитывая близкие природно-климатические и лесорастительные условия развития рассматриваемых ельников, различия признаков радиального прироста деревьев ели между ПП, находящимися на разном удалении от источ-

ников аэровыбросов, на наш взгляд, позволит определить силу и длительность воздействия поллютантов, выделяемых при целлюлозно-бумажном производстве, на растения. Согласно кластерному анализу, обобщённые древесно-кольцевые хронологии с более отдалённых от источников аэротехногенного загрязнения ПП 24 и 50 относятся к сравнительно однородной группе (рис. 3). К ним близка группа хронологий из ПП 5 и 11. Отдельно от всех отстоит хронология ПП 4 – ближайшая к источникам загрязнения.

Итоги кластеризации согласуются с динамикой радиального прироста деревьев ели. За период функционирования СЛПК отмечается схожая синхронная динамика прироста ели по радиусу ствола по всем ПП (рис. 4). Затем, ближайшая к источникам загрязнения древесно-кольцевая хронология ПП 4 показывает резкое увеличение (в три

раза) радиального прироста древесины ели с пиком в 1987 г., после чего он постепенно скачкообразно снижается, оставаясь до настоящего времени сравнительно высоким. В это же время отмечено небольшое увеличение прироста ели по диаметру ствола на ПП 5 и 11 – отдалённых от ПП 4 и немного отстоящих от направления преобладающих ветров. На ПП 25 и 50, находящихся на значительном удалении от дымовых труб СЛПК, выбросы от целлюлозно-бумажного производства не отразились на динамике радиального прироста ели. Таким образом, ПП 4, 5 и 11 можно отнести к зоне воздействия атмосферных выбросов (импактной зоне), а ПП 24 и 50 к фоновым районам. Схожее зонирование территории аэротехногенного загрязнения от СЛПК получено по результатам оценки состояния эпифитного лишайникового покрова и хвойных фитоценозов [22, 23], а также мониторингу химического состава снежного покрова [24].

Отмечено, что основное воздействие аэрополлютантов от производственной деятельности СЛПК на хвойные сообщества происходит в импактной зоне [22, 23, 25–27]. Это подтверждают и наши результаты исследования. Согласно [25], динамика состояния древостоев ельников черничных в зоне загрязнения улучшилась за период с 2009 по 2016 гг. По индексу повреждённости авторы характеризовали древостой в 2009 г. как «ослабленные», а к 2016 г. их большинство перешло в состояние «здоровые».

По нашим данным, в настоящее время жизнеспособность древостоев, подверженных загрязнению, почти не отличается от фонового района (ПП 24 и 50). Одним из факторов восстановления здорового состояния лесных сообществ вблизи СЛПК может являться сокращение выбросов загрязняющих веществ предприятия в воздушный бассейн в связи с модернизацией очистных сооружений в 2008–2018 гг.

Неспецифическую реакцию на аэротехногенные выбросы СЛПК показал радиальный прирост деревьев ели во всех исследуемых еловых фитоценозах импактной зоны. Динамика прироста деревьев с начального периода работы предприятия (1969 г.) на подверженной техногенной нагрузке территории и фоновых районах имеет близкие значения. Отмеченное нами увеличение прироста ели приурочено ко времени выхода предприятия на установленные мощности (конец 1980-х гг.). Затем прослеживается продолжительное скачкообразное снижение прироста. Этот период характеризуется спадом производства в связи с ухудшением финансовой ситуации в стране (1990-е гг.) и модернизацией производства (2008–2018 гг.), приведшее, как следствие, к уменьшению концентрации газопылевых выбросов предприятия. Однако, мы не исключаем возможности, что на столь значительное стимулирование радиального прироста стволовой древесины ели на ПП 4 в совокупности с аэровыбросами СЛПК могли повлиять

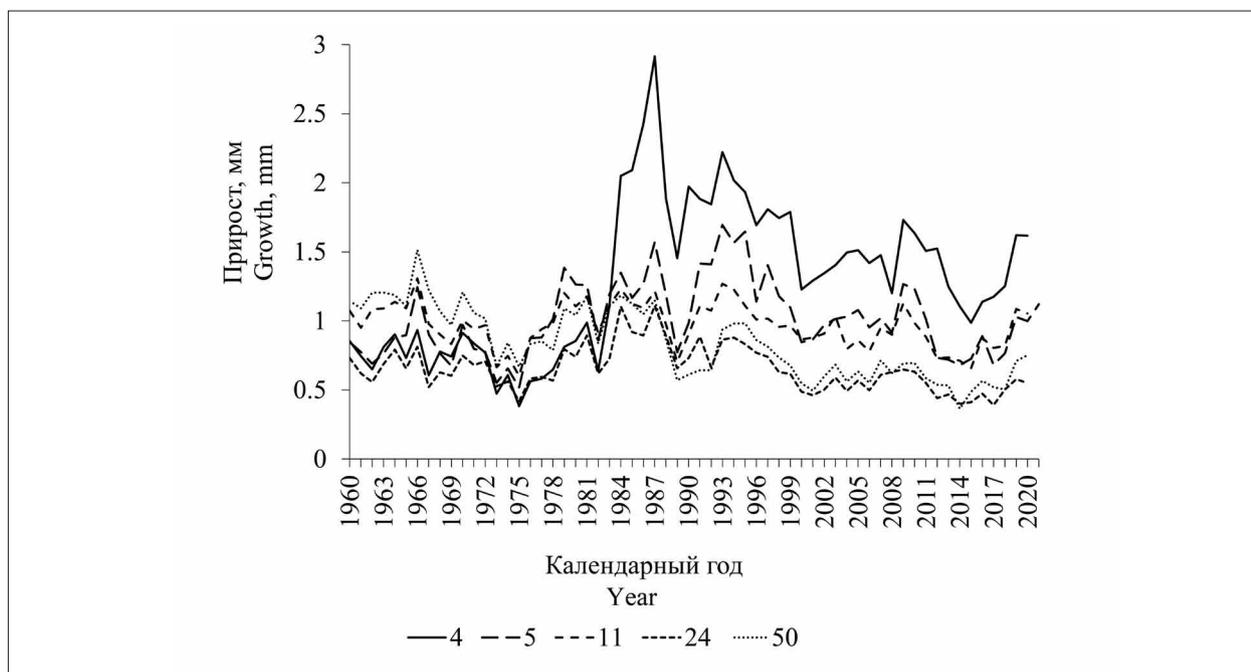


Рис. 4. Динамика абсолютного радиального прироста деревьев ели по пробным площадям 4, 5, 11, 24 и 50
 Fig. 4. The dynamics of the absolute radial growth of spruce trees in sample plots No. 4, 5, 11, 24 and 50

загрязнения от сельскохозяйственной деятельности, развитой в относительной близости (1,5 км) от объекта исследования. При натурных исследованиях видимых антропогенных загрязнений поверхности почвы изучаемых фитоценозов нами не выявлено.

Известно, что промышленные выбросы трансформируют, прежде всего, физико-химические свойства почвы. Для импактной зоны СЛПК установлены изменения кислотно-основного состояния почв в сторону их подщелачивания, а также повышенная концентрация железа и углеводов [28]. Наиболее чувствительными к почвенным загрязнителям являются поглощающие корни растений [29]. Изучение жизнестойкости корневых систем деревьев на территории, подверженной воздействию выбросов СЛПК, не проводилось. Некоторые типы смешанных загрязнений имеют возможность стимулировать ростовые процессы у древесных растений [7, 9, 10]. Так, слабые концентрации углеводов от нефтехимической промышленности увеличивают содержание в почве макроэлементов, которые могут действовать в качестве подкормки для древесных пород, способствуя увеличению их стволовой массы [10]. Щелочные загрязнения хоть и нейтрализуют кислую среду лесных почв, но способны повреждать ассимиляционный аппарат растений, разрушать синузии эпифитных лишайников [7].

Таким образом, определённый тип смешанных аэровыбросов СЛПК и небольшой их объём могут стимулировать увеличение радиального прироста деревьев ели в ельниках черничных на автоморфных почвах. Однако, в условиях сильного загрязнения атмосферы выбросами SO₂ с примесями тяжёлых металлов ростовые процессы у хвойных растений снижаются на 40–70% [30].

Заключение

Сокращение объёмов атмосферных выбросов от целлюлозно-бумажного производства ведёт к восстановлению жизненного состояния древостоев ельников черничных свежих в импактной зоне СЛПК. При этом радиальный прирост деревьев ели на загрязнённой территории остаётся выше, чем на фоновых участках. Дальнейшее снижение выбросов будет способствовать полному восстановлению естественной структуры еловых фитоценозов, усиливая их средообразующие, водоохранные, защитные и санитарно-гигиенические функции.

Авторы глубоко признательны доктору биологических наук Капитолине Степановне Бобковой, под чьим руководством заложены объекты и начаты на них исследования, а также сотрудникам отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН: Н.В. Торлоповой, И.Н. Кутявину, А.И. Патову и С.Н. Наймушиной, принимавшим участие в сборе полевых материалов. Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Литература

1. Рассеянные элементы в бореальных лесах / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2004. 616 с.
2. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурызбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-методическое пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.
3. Леса Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: «Дизайн. Информация. Картография», 1999. 332 с.
4. Василевич В.И. Ельники черничные европейской России // Ботанический журнал. 2004. Т. 89. № 11. С. 1728–1739.
5. Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции / Под ред. К.С. Бобковой, Э.П. Галенко. СПб.: Наука, 2006. 337 с.
6. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2000. 512 с.
7. Алексеев А.С. Колебания радиального прироста в древостоях при атмосферном загрязнении // Лесоведение. 1990. № 2. С. 82–86.
8. Назаров А.В. Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения // Вестник Пермского университета. 2007. № 5 (10). С. 134–141.
9. Чжан С.А., Рунова Е.М., Пузанова О.А., Чжан Л.А. Изменение радиального прироста сосны обыкновенной в зоне промышленного загрязнения // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 29. № 3–4. С. 304–308.
10. Уразгильдин Р.В., Полякова Г.Р., Аминова К.З., Галиахметов Р.Д., Кулагин А.Ю. Прирост стволовой древесины сосны обыкновенной, ели сибирской и лиственницы Сукачёва в условиях промышленного загрязнения // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. биол. 2018. Т. 123. № 2. С. 45–61.
11. Забова И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1975. 344 с.
12. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Под ред. А.И. Таскаева. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 416 с.
13. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.

14. Горячев В.М. Подготовка дендрохронологических образцов для измерения под микроскопом // Лесоведение. 2003. № 1. С. 65–77.

15. Grissino-Mayer H.D. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer // Tree-ring Research. 2003. V. 59. No. 2. P. 63–79.

16. Тишин Д.В. Дендроэкология (методика древесно-кольцевого анализа). Казань: **Казанский университет**, 2011. 33 с.

17. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // Tree-ring Research. 2001. V. 57. No. 2. P. 205–221.

18. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // Dendrochronologia. 2008. V. 26. No. 2. P. 115–124. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002

19. Gavrikov V., Stoyan D. The use of marked point processes in ecological and environmental forest studies // Environ. Ecol. Stat. 1995. V. 2. No. 4. P. 331–344. doi: 10.1007/BF00569362

20. Манов А.В., Кутявин И.Н. Пространственные взаимосвязи в размещении древесных растений в среднетаёжных коренных ельниках верховьев реки Печоры // Сибирский лесной журнал. 2021. № 2. С. 82–95. doi: 10.15372/SJFS20210208

21. Suzuki R., Shimodaira H. PvcLust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering // Bioinformatics. 2006. V. 22. No. 12. P. 1540–1542. doi: 10.1093/bioinformatics/btl117

22. Бобкова К.С., Паутов Ю.А., Терещук Н.А. Состояние лесов в зоне влияния Сыктывкарского лесопромышленного комплекса // Изв. вузов. Лесной журнал. 1997. № 5. С. 83–88.

23. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 138 с.

24. Василевич М.И., Кондратенок Б.М., Очертенко Д.П., Василевич Р.С., Габов Д.Н., Лодыгин Е.Д. Мониторинг аэротехногенного воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг госресурсов. 2021. Т. 332. № 10. С. 33–44. doi: 10.18799/24131830/2021/10/3395

25. Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. Мониторинг состояния ельников в условиях загрязнения целлюлозно-бумажного производства // Растительные ресурсы. 2018. Т. 54. № 1. С. 42–58.

26. Тужилкина В.В., Плюснина С.Н. Комплексная оценка состояния хвои *Picea obovate* (Pinaceae) в условиях аэротехногенного загрязнения // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50. № 4. С. 579–587.

27. Тужилина В.В. Влияние аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства на пигментный комплекс сосны обыкновенной // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 90–96. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-090-096

28. Лаптева Е.М., Холопов Ю.В., Шахтарова О.В., Бондаренко Н.Н., Кострова С.Н. Почвы и почвенный покров в зоне влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства // Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия Экспериментальная биология и экология. 2021. № 5 (51). С. 46–60. doi: 10.19110/1994-5655-2021-5-46-60

29. Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб: Изд-во НИИ химии С.-Петерб. гос. ун-та, 1997. 240 с.

30. Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на европейском севере России: структура, особенности роста, состояние // Сибирский лесной журнал. 2021. № 3. С. 44–55. doi: 10.15372/SJFS20210305

References

1. Scattered elements in boreal forests / Ed. A.S. Isaev. Moskva: Nauka, 2004. 616 p. (in Russian).

2. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirilyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. Methods of dendrochronology. Fundamental of dendrochronology. Collection of data from tree-rings. Krasnoyarsk: Izd-vo KrasGU, 2000. V. 1. 80 p. (in Russian).

3. Forest of the Komi Republic / Eds. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev. Moskva: "Dizayn. Informatsiya. Kartografiya", 1999. 332 p. (in Russian).

4. Vasilevich V.I. Bilberry spruce forests in European Russia // Botanicheskiy zhurnal. 2004. V. 89. No. 11. P. 1728–1739 (in Russian).

5. Virgin spruce forest of North: biodiversity, structure, functions / Eds. K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Sankt-Peterburg: Nauka, 2006. 337 p. (in Russian).

6. Forestry and forest resources of the Komi Republic / Eds. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev. Moskva: Dizayn. Informatsiya. Kartografiya, 2000. 512 p. (in Russian).

7. Alekseev A.S. Fluctuations in radial growth in tree stands under atmospheric pollution // Lesovedenie. 1990. No. 2. P. 82–86 (in Russian).

8. Nazarov A.V. The effect of oil pollution of soil on plants // Vestnik Permskogo universiteta. 2007. No. 5 (10). P. 134–141 (in Russian).

9. Chzhan S.A., Runova E.M., Puzanova O.A., Chzhan L.A. Change in radial growth of scotch pine in the zone of industrial pollution // Khvoynye borealnoy zony. 2011. V. 29. No. 3–4. P. 304–308 (in Russian).

10. Urazgildin R.V., Polyakova G.R., Amineva K.Z., Galiakhmetov R.D., Kulagin A.Yu. Pine, spruce and larch stem wood increment in industrial pollution conditions // Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskoy. 2018. V. 123. No. 2. P. 45–61 (in Russian).

11. Zaboieva I.V. Soils and land resources of the Komi ASSR. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatelstvo, 1975. 344 p. (in Russian).

12. Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology / Ed. A.I. Taskaev. Moskva: Drofa; DiK, 1997. 116 p. (in Russian).
13. Forest ecosystems and atmospheric pollution / Ed. V.A. Alekseev. Leningrad: Nauka, 1990. 200 p. (in Russian).
14. Goryachev V.M. Preparation of dendrochronological samples for microscopic measurements // *Lesovedenie*. 2003. No. 1. P. 65–77 (in Russian).
15. Grissino-Mayer H.D. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer // *Tree-ring Research*. 2003. V. 59. No. 2. P. 63–79.
16. Tishin D.V. Dendroecology (method of tree-ring analysis). Kazan: Kazanskiy universitet, 2011. 33 p. (in Russian).
17. Grissino-Mayer H.D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // *Tree-ring Research*. 2001. V. 57. No. 2. P. 205–221.
18. Bunn A.G. A dendrochronology program library in R (dplR) // *Dendrochronologia*. 2008. V. 26. No. 2. P. 115–124. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
19. Gavrikov V., Stoyan D. The use of marked point processes in ecological and environmental forest studies // *Environ. Ecol. Stat.* 1995. V. 2. No. 4. P. 331–344. doi: 10.1007/BF00569362
20. Manov A.V., Kutuyavin I.N. Spatial interrelations in the placement of woody plants in the middle taiga virgin spruce forests of the upper reaches of the Pechora river // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal*. 2021. No. 2. P. 82–95 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20210208
21. Suzuki R., Shimodaira H. PvcLust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering // *Bioinformatics*. 2006. V. 22. No. 12. P. 1540–1542. doi: 10.1093/bioinformatics/btl117
22. Bobkova K.S., Pautov Yu.A., Tereshchuk N.A. The state of forests in the zone of influence of the Syktyvkar timber industry complex // *Izvestiya Vuzov. Lesnoy Zhurnal*. 1997. No. 5. P. 83–88 (in Russian).
23. Torlopova N.V., Robakidze E.A. Effect of pollutants on coniferous phytocenoses (on the example of the Syktyvkar timber industry complex). Ekaterinburg: UrO RAN, 2003. 138 p. (in Russian).
24. Vasilevich M.I., Kondratenok B.M., Ocheretenko D.P., Vasilevich R.S., Gabov D.N., Lodygin E.D. Monitoring of the aerotechnogenic impact of the Syktyvkar timber industry complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021. V. 332. No. 10. P. 33–44 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2021/10/3395
25. Robakidze E.A., Torlopova N.V. Monitoring of the spruce forests status under pollution from pulp and paper mill emissions // *Rastitelnye Resursy*. 2018. V. 54. No. 1. P. 42–58 (in Russian).
26. Tuzhilkina V.V., Plyusnina S.N. Evaluation of *Picea obovata* (Pinaceae) needles condition under aerotechnogenic pollution // *Rastitelnye resursy*. 2014. V. 50. No. 4. P. 579–587 (in Russian).
27. Tuzhilkina V.V. Effect of aerotechnogenic impact of pulp and paper production on the pigment complex of Scots pine // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 90–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-090-096
28. Laptёva E.M., Kholopov Yu.V., Shahtarova O.V., Bondarenko N.N., Kostrova S.N. Soils and soil cover in the zone of influence of airborne industrial emissions from pulp and paper production // *Izvestija Komi nauchnogo centra UrO RAN. Seriya Eksperimentalnaya biologiya i ekologiya*. 2021. No. 5 (51). P. 46–60 (in Russian). doi: 10.19110/1994-5655-2021-5-46-60
29. Yarmishko V.T. Scotch pine and aerial pollution in the European North. Sankt-Peterburg: Izd-vo NII himii Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 1997. 210 p. (in Russian).
30. Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V. Communities of *Pinus sylvestris* L. in the technogenic environment in the European north of Russia: structure, features of growth, condition // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal*. 2021. No. 3. P. 44–55 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20210305

Накопление тяжёлых металлов в почвах и листьях берёзы повислой (*Betula pendula*) в условиях загрязнения городской среды

© 2025. А. С. Петухов, к. х. н., ст. преподаватель, Т. А. Кремлева, д. х. н., профессор, Е. Д. Левчук, студент, Н. А. Хритохин, к. х. н., профессор, Г. А. Петухова, д. б. н., профессор, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, e-mail: revo251@mail.ru

Целью работы было исследование особенностей миграции тяжёлых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в системе почва – берёза повислая (*Betula pendula*), а также установление вклада аэротехногенной миграции металлов в их общее накопление листьями берёзы. Пробы почвы и листьев берёзы повислой были отобраны вблизи промышленных предприятий и транспортных узлов г. Тюмени. Содержание подвижной и кислоторастворимой формы металлов в почвах, а также содержание металлов в отмытых и не отмытых листьях берёзы определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Накопление металлов в городских почвах относительно контроля убывало в ряду: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn, наблюдались превышения ПДК по содержанию Pb и Ni. Накопление металлов в листьях берёзы убывало в ряду: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd, отмечено превышение максимально-допустимого уровня для Pb, Zn, Ni, Fe и Cr. Наибольшее накопление металлов в почвах наблюдалось в районе железнодорожного вокзала, а в растениях – вблизи металлургического завода. Подвижность тяжёлых металлов в почве убывала в ряду Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe, что коррелирует с изменением их биодоступности по накоплению в листьях берёзы повислой: Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co. Вклад аэротехногенной миграции, изученный по разности содержания металлов в отмытых и не отмытых листьях берёзы, составлял в основном 20–30%, и по склонности к воздушному переносу металлы располагались в ряд: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. Отмечена взаимозависимость между степенью воздушного переноса металлов и летучестью их соединений.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, почвы, растения, аэротехногенная миграция, фактор биоконцентрации, аккумуляция.

Heavy metal accumulation in soils and leaves of *Betula pendula* in urban pollution conditions

© 2025. A. S. Petukhov ORCID: 0000-0003-2906-174X, T. A. Kremleva ORCID: 0000-0002-8157-8677, E. D. Levchuk ORCID: 0009-0000-0795-6644, N. A. Khritokhin ORCID: 0000-0003-0580-2283, G. A. Petukhova ORCID: 0000-0001-9229-4912, University of Tyumen, 6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003, e-mail: revo251@mail.ru

The main aim was to study heavy metal (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) migration in soil-birch (*Betula pendula*) system, as well as to determine the contribution of metal aerotechnogenic migration to their total accumulation by birch leaves. Soils and birch leaves were sampled near industrial enterprises and transport hubs in Tyumen. The mobile and acid-soluble metal fraction content in soils, as well as metal content in washed and unwashed birch leaves were determined by atomic emission spectroscopy. Metal accumulation in urban soils compared to the control decreased in the order: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn. Pb and Ni content exceeded the MPC. Metal accumulation in birch leaves decreased in the order: Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd. Pb, Zn, Ni, Fe, and Cr content exceeded the MPC. The greatest metal accumulation in soil was at railway station, while in birch leaves – in the vicinity of metallurgical plant. Metal mobility in soil decreased in the order Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe, which correlated with their bioavailability: Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co. The contribution of aerotechnogenic metal migration studied by the difference of metal content in washed and unwashed leaves, was 20-30%. Aerotechnogenic migration decreased in the order: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. The correlation between aerotechnogenic migration and metal compounds volatility was established.

Keywords: heavy metals, soils, plants, aerotechnogenic migration, bioconcentration factor, accumulation.

Проблема загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) остаётся одной из наиболее актуальных в экологии. Это объясняется повсеместным использованием металлов в хозяйственной деятельности, длительным периодом удаления металлов из почв и живых организмов, а также способностью к миграции по пищевым цепям [1]. Источниками загрязнения ТМ являются выбросы металлургических предприятий, транспорт, производство и утилизация химических источников тока, электростанции, процессы транспортировки и переработки нефти, удобрения и пестициды [1–3].

Загрязнение почв ТМ приводит к их поступлению и накоплению в растениях. Тяжёлые металлы способны оказывать разнообразное токсическое действие в растительных клетках, нарушая процессы роста, фотосинтеза и дыхания [1, 4]. Наибольший стресс от загрязнения ТМ испытывают урбоценозы, растительность которых представлена в большей степени древесными растениями. Деревья в городских ландшафтах увеличивают биоразнообразие, выделяют кислород, понижают температуру воздуха и уровень шума. В литературе описана способность растений к фоллиарному транспорту ТМ [5]. Деревья, поглощая токсичные газы и пыль, являются фильтрами городского воздуха, поэтому актуальным является установление степени почвенной и атмосферной миграции металлов в содержание ТМ листьями деревьев.

Тюмень является быстро развивающимся индустриальным городом с большим количеством автотранспорта на душу населения, что создаёт угрозу загрязнения ТМ. Содержание ТМ в почвах г. Тюмени было ранее описано в литературе [6–9], однако проблема накопления металлов растениями города в литературе не представлена.

Целью работы стало выявление особенностей миграции тяжёлых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr) в системе почва – берёза повислая (*Betula pendula*), а также установление вклада аэротехногенной миграции металлов в их общее накопление листьями берёзы.

Объекты и методы исследования

Пробы почвы и листьев берёзы повислой (*Betula pendula*) собраны в г. Тюмени в сентябре 2022 г. на следующих участках: контроль – участок на удалении 40 км от города, на удалении 200 м от аэропорта «Рощино», железнодорожного вокзала и автовокзала,

а также на удалении 200 м от предприятий: моторостроительного завода (Моторный завод), нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), аккумуляторного завода (Аккумуляторный завод) и металлургического завода (УГМК).

Пробы почвы отбирали методом конверта с площади 100 м² на глубину 0–10 см согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. В качестве контроля был выбран участок, удалённый от источников антропогенного загрязнения. Почвы на всех участках относились к дерново-подзолисто-му типу. Зелёные листья берёзы (не менее 100 шт на каждом участке) отбирали на высоте 2–2,5 м. Одну часть листьев тщательно промывали бидистиллированной водой и высушивали на воздухе (отмытые листья), а другую высушивали и анализировали без предварительной подготовки (неотмытые листья). По разнице содержания ТМ в отмытых и неотмытых растениях оценивали вклад аэротехногенной миграции металлов.

В пробах почв извлекали кислоторастворимую форму металлов с помощью 5 М HNO₃ (РД 52.18.191-2018) и подвижную форму с помощью ацетатно-аммонийного буфера с рН, равным 4,8 (РД 52.18.289-90). Извлечение металлов из проб листьев берёзы проводили 5 М HNO₃. Процедуру пробоподготовки проводили в двух повторностях. Содержание металлов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе PlasmaQuant PQ 9000 в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета.

Санитарно-гигиеническую оценку качества почв проводили по значению суммарного показателя загрязнения Z_c:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\text{контроль}}} - (n-1),$$

где C_i – содержание кислоторастворимой формы металла в почве исследуемого района, C_{контроль} – содержание кислоторастворимой формы металла в почве контроля, n – количество исследуемых металлов.

Подвижность ТМ в почве определяли как отношение содержания подвижной формы к кислоторастворимой. Для оценки биодоступности металлов рассчитывали фактор биоконцентрации как отношение содержания металла в отмытых листьях к содержанию кислоторастворимой формы в почве. Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке с расчётом дове-

рительного интервала и проведением корреляционного анализа в программе Statistica 12 при P=0,95.

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания тяжёлых металлов в изученных почвах г. Тюмени представлены в таблице 1. Содержание большинства металлов было повышено по сравнению с контролем практически на всех участках в городской среде. В целом, накопление ТМ почвами относительно контроля убывало в ряду: Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn. Превышение содержания кислоторастворимой формы ТМ достигало для Cd 18 раз, для Pb – 20 раз, Cr – 12 раз, Ni – 11 раз, Zn – 5,5 раз по сравнению с контрольной почвой. В то же время, накопления Fe, Co и Mn в почвах городской среды относительно контроля практически не наблюдалось, что свидетельствует преимущественно о природном фоне этих металлов в почве.

Содержание Cd, Cu, Zn и Fe в почвах г. Тюмени оказалось близким к их концентрациям в почвах г. Твери [10], а содержание Cu и Zn было аналогичным в промышленной

городской зоне в Польше [11]. Аналогичное содержание Ni было зарегистрировано в почвах Красноярского края [12] и промышленной зоне в Узбекистане [13]. Содержание Pb вблизи аккумуляторного завода и железнодорожного вокзала было близким к его уровню в почве вблизи горно-металлургического завода в Узбекистане [13]. Содержание Mn в почвах г. Тюмени соответствовало ранее опубликованным данным [7], а также близко к его содержанию в почве из карьеров Челябинской области [14]. На Южном Урале отмечено близкое загрязнение почв Zn, Pb и Cd под влиянием горно-металлургической промышленности, выбросов предприятий машиностроения, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов [15]. Загрязнение почвы Cr вблизи железнодорожного вокзала оказалось сравнимым с промышленной зоной в провинции Шэньси, Китай [16]. Содержание Co в городских почвах было близким к его содержанию в почвах из урановых шахт в Южном Китае [17].

По степени накопления ТМ относительно контроля изученные участки можно расположить в следующий ряд: железнодорожный вокзал > аккумуляторный завод > УГМК >

Таблица 1 / Table 1
Содержание тяжёлых металлов в почвах г. Тюмени (мг/кг)
Heavy metal content (mg/kg) in Tyumen soil

Металл Metal	Контроль Control	Авто- вокзал Bus station	Моторный завод Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуля- торный завод Battery- manufacturing plant	УГМК Metallur- gical plant	Аэропорт Airport	Железнодорожный вокзал Railway station
Cu	<u>0,33±0,01</u> 6,1±0,2	<u>0,24±0,03</u> 12±1	<u>0,45±0,02</u> 7,5±0,3	<u>0,64±0,05</u> 9,4±0,3	<u>0,35±0,02</u> 20±1	<u>0,51±0,02</u> 15±1	<u>0,17±0,01</u> 14±1	<u>2,9±0,1</u> 30±2
Zn	<u>1,1±0,1</u> 15±1	<u>2,1±0,1</u> 25±2	<u>2,7±0,1</u> 13±1	<u>8,0±0,4</u> 27±2	<u>5,3±0,2</u> 45±3	<u>14,2±0,6</u> 44±3	<u>4,5±0,2</u> 33±2	<u>29±1</u> 84±5
Fe	<u>100±10</u> 4200±500	<u>5,9±0,2</u> 5200±400	<u>26±1</u> 2000±100	<u>15±1</u> 2500±500	<u>12±1</u> 8400±100	<u>26±2</u> 3700±500	<u>7,7±0,2</u> 7000±800	<u>22±1</u> 6400±900
Mn	<u>109±2</u> 580±20	<u>88±5</u> 550±20	<u>115±2</u> 380±10	<u>119±3</u> 370±10	<u>121±4</u> 480±10	<u>158±7</u> 430±10	<u>113±1</u> 600±10	<u>96±2</u> 300±10
Pb	<u>1,2±0,1</u> 7,9±0,2	<u>1,3±0,1</u> 9,7±0,5	<u>2,0±0,1</u> 8,1±0,4	<u>4,6±0,2</u> 14±1	<u>53±2</u> 156±9	<u>3,2±0,2</u> 13±1	<u>2,4±0,1</u> 17±1	<u>54±2</u> 120±4
Cd	<u>≤0,01</u> ≤0,01	<u>0,01±0,01</u> 0,02±0,01	<u>≤0,01</u> ≤0,01	<u>0,03±0,01</u> 0,03±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,17±0,01	<u>0,07±0,01</u> 0,10±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,15±0,01	<u>0,14±0,01</u> 0,17±0,01
Ni	<u>3,8±0,1</u> 13±1	<u>2,3±0,1</u> 24±1	<u>3,5±0,2</u> 14±1	<u>3,1±0,2</u> 23±1	<u>2,4±0,1</u> 38±2	<u>2,9±0,2</u> 19±1	<u>1,9±0,1</u> 31±2	<u>12±1</u> 145±4
Co	<u>0,28±0,01</u> 6,6±0,9	<u>0,17±0,01</u> 9,6±0,9	<u>0,41±0,04</u> 5,4±0,1	<u>0,30±0,02</u> 4,8±0,2	<u>0,41±0,02</u> 8,8±1,6	<u>0,46±0,02</u> 5,8±0,8	<u>0,33±0,01</u> 9,8±0,3	<u>0,64±0,03</u> 8,8±0,6
Cr	<u>0,60±0,05</u> 8,4±0,4	<u>0,26±0,02</u> 17±1	<u>0,28±0,03</u> 6,2±0,1	<u>0,43±0,08</u> 14±1	<u>0,28±0,09</u> 25±1	<u>0,48±0,02</u> 14±1	<u>0,19±0,04</u> 19±1	<u>1,3±0,1</u> 99±3

Примечание: над чертой – подвижная форма, под чертой – кислоторастворимая.
Note: above the line – mobile fraction, under the line – acid-soluble fraction.

аэропорт > НПЗ > автовокзал > моторостроительный завод. По результатам расчёта суммарного показателя загрязнения район железнодорожного вокзала и аккумуляторного завода можно отнести к участку «высокого загрязнения» ($Z_c=60, 45$ соответственно), район аэропорта – к участку «среднего загрязнения» ($Z_c=22$), УГМК – «низкому загрязнению» ($Z_c=14$).

Высокое содержание ТМ в почве вблизи железнодорожного вокзала, вероятно, связано со сгоранием ископаемого топлива, истиранием ходовой части поездов и рельсов, перевозкой грузов, содержащих металлы (руды, удобрения, цемент). Повышенное содержание Fe, Ni и Pb в районе аккумуляторного завода и железнодорожного вокзала может быть вызвано производством и использованием железо-никелевых и свинцово-кислотных аккумуляторов. Накопление Zn в почве в районе УГМК может быть вызвано применением оцинкованного лома в производстве стали. Содержание Co превышало контроль на 30–40% только в районах с большим транспортным потоком: автовокзал, аэропорт и железнодорожный вокзал. Вероятно, это указывает на повышенную концентрацию Co в выхлопных газах от различных видов транспорта. Аналогично повышенное содержание Fe было отмечено в районах с большим количеством транспорта, вероятно, это связано с использованием соединений Fe, например, ферроцена, в качестве присадок к топливу.

В ряде случаев содержание ТМ в почвах превышало ПДК (СанПиН 1.2.3.3685-21) по подвижным формам: Pb, Ni и Zn в районе железнодорожного вокзала в 9,0, 3,0 и 1,3 раза, Pb в районе аккумуляторного завода в 9 раз, а также на уровне ПДК по содержанию Cu в районе железнодорожного вокзала. Кроме того, зарегистрировано превышение ПДК по валовому содержанию Ni и Pb в районе железнодорожного вокзала в 1,8 и 1,2 раза соответственно. Практически во всех изученных пробах, включая контроль, отмечено превышение ПДК подвижной формы (100 мг/кг), что свидетельствует о повышенном биогеохимическом фоне этого элемента в районе исследования.

Подвижность ТМ в почвах убывала в ряду: Cd > Pb > Mn > Zn > Ni > Co > Cu > Cr > Fe (рис.). Подвижность Cd в почве достигала 94%, в то время как доля подвижных форм Fe не превышала 2,4%. Подвижность металлов может указывать на их форму в почве. Для Fe характерно присутствие в почве в форме малорастворимых оксидов [3]. Низкая подвижность Cr указывает на его нахождение в трёхвалентной форме, т. к. соединения шестивалентного Cr более растворимы и подвижны в почве [18]. Низкая подвижность Cu и Co, вероятно, говорит о закреплении металлов в минеральной части почвы. Высокая подвижность Zn находится в соответствии с данными, что Zn имеет более низкое сродство к гумусовым кислотам,

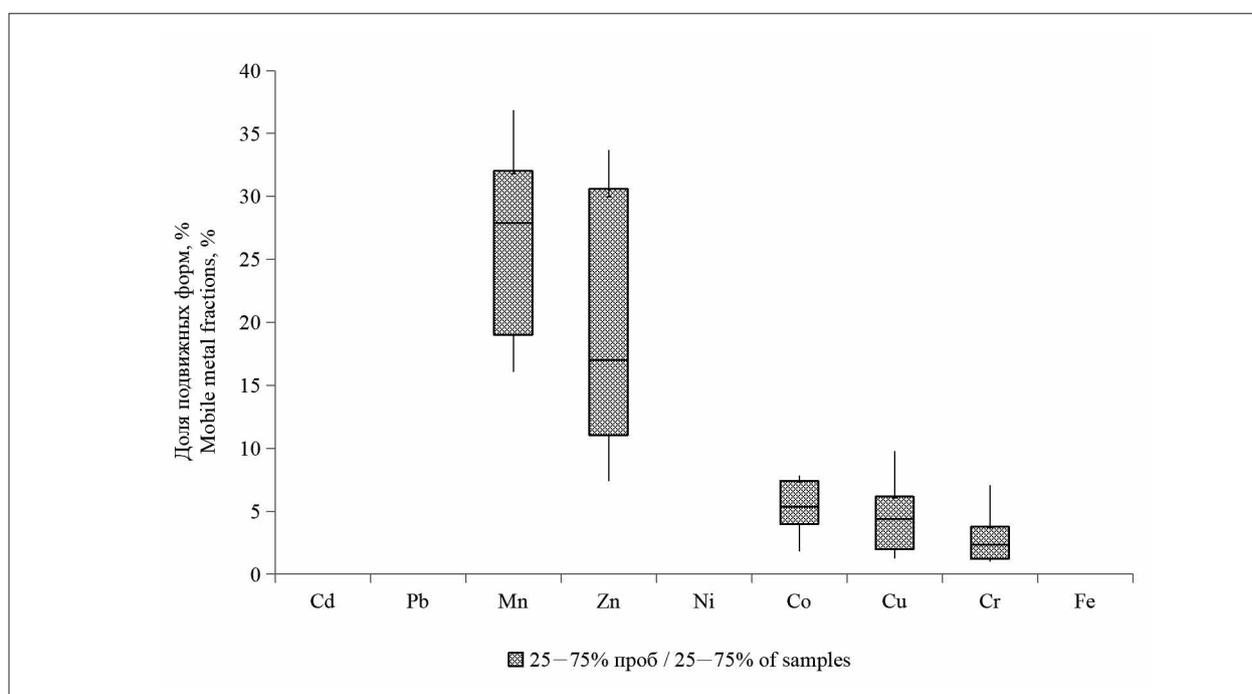


Рис. Подвижность тяжёлых металлов в почвах г. Тюмени
Fig. Heavy metal mobility in Tyumen soils

чем другие ТМ [3]. Марганец и кадмий образуют стабильные аквакомплексы и обладают низким сродством к гумусовому веществу, слабой комплексообразующей способностью, что обуславливает высокую подвижность в почве [3]. Подвижность **Mn в почве оказалась близкой к его подвижности в почвах в районе горного комбината в Армении [19].** Свинец в среде ацетатно-аммонийного буфера переходит в хорошо растворимую и стабильную форму ацетата $Pb(CH_3COO)_2$. В ряде случаев загрязнение почвы ТМ относительно контроля сопровождалось их максимальной подвижностью: на участке УГМК (Zn, Co, Mn), железнодорожный вокзал (Zn, Pb, Mn, Cu), НПЗ (Cd). **Это может создать опасность поступления металлов в растения и пищевые цепи.**

Содержание ТМ в листьях берёзы представлено в таблице 2. Концентрация практически всех металлов в листьях берёзы из городской среды была повышена по сравнению с контролем. В целом, накопление металлов растениями относительно контроля убывало в ряду: $Pb > Cr > Fe > Co > Cu > Ni > Zn > Mn > Cd$. Превышение контроля для Pb достигало 95 раз, Cr – 22 раз, Fe – 5,7 раз, Co – 4 раз. Интенсивное накопление Pb растениями коррелирует с его высокой подвижностью в почве.

Содержание Cu и Pb в листьях берёзы в районе бывшей угольной шахты в Чехии оценивали в 6–14 и 0,8–9,5 мг/кг соответственно, что близко к полученным результатам [20]. Содержание Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd и Ni в листьях берёзы оказалось близким к их концентрациям в листьях берёзы из парков и скверов г. Красноярска [21]. Листья берёзы в промышленной зоне г. Калининграда накапливали 80 мг/кг Zn и 360 мг/кг Mn [22], что соответствует результатам нашего исследования.

Изученные районы можно расположить в следующий ряд по относительному накоплению металлов листьями берёзы: УГМК > аккумуляторный завод > НПЗ > железнодорожный вокзал > моторостроительный завод > автовокзал > аэропорт. Несмотря на «очень высокое загрязнение» в районе железнодорожного вокзала, накопление ТМ в листьях берёзы оказалось невысоким, вероятно, из-за адаптации растений к высокому уровню загрязнения путём исключения металлов в ризосфере. То же можно отметить для Cd: несмотря на его высокую подвижность в почве, аккумуляции Cd растениями не выявлено, вероятно, из-за барьеров растений перед его высокой токсичностью. С другой стороны,

наблюдалось накопление железа, обладающего низкой подвижностью в почве, по всей видимости, за счёт его активного транспорта белками-транспортёрами как жизненно важного микроэлемента. В отличие от накопления в почвах, отмечено высокое накопление Cr и Co листьями берёзы в районе НПЗ, что вероятно обусловлено применением этих металлов в качестве катализаторов нефтехимических процессов.

В связи с отсутствием ПДК металлов в растениях для санитарно-гигиенической оценки листьев берёзы и сравнения полученных результатов можно использовать временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (123-4/281-8-87) и государственную фармакопею Российской Федерации ОФС 1.5.3.0009.15. Выявлено превышение МДУ по содержанию Pb в районе УГМК и аккумуляторного завода (5 мг/кг), фармакопейной нормы Pb (6 мг/кг) вблизи аккумуляторного завода. Содержание Zn и Ni превышало МДУ (50 и 3 мг/кг соответственно) на всех изученных участках, включая контроль, до 3 и 2,5 раз соответственно. Содержание Fe превышало МДУ (100 мг/кг) на большинстве участков в городской среде. Зарегистрировано превышение МДУ Cr (0,5 мг/кг) в районе автовокзала, моторостроительного завода, НПЗ, УГМК и железнодорожного вокзала до 5 раз.

Обработка листьев берёзы дистиллированной водой выявила аэротехногенную миграцию металлов. Вклад аэротехногенной миграции отличался для разных металлов и в целом уменьшался в ряду: $Cr > Ni > Cd \approx Mn > Fe > Zn \approx Pb \approx Co > Cu$. Это соответствует ранее полученным результатам о высокой склонности Cr к воздушному переносу и о низком вкладе Cu в аэротехногенную миграцию [23]. Аэротехногенная миграция Cr и Ni достигала 50–60% (в среднем 25–30%) и наблюдалась практически на всех участках, а для Cu была незначима, выражена только в районе железнодорожного вокзала – до 15%. В предыдущих исследованиях анализ пыли древесных растений указал на вклад атмосферного поступления Cu, как минимум, 30% [24]. Снижение содержания Mn в отмытых листьях дуба в г. Риме по сравнению с неотмытыми составляло до 25% [25], в нашем исследовании 12–45%. За исключением отдельных случаев воздушного переноса Ni и Cr, почвенная миграция металлов в листья

берёзы преобладала над воздушным переносом и составляла соответственно 65–100%.

Обнаружена корреляция между склонностью металлов к аэротехногенной миграции и температурами плавления их хлоридов ($R=0,63$) и кипения их оксидов ($R=0,62$). Вероятно, металлы, образующие более летучие соединения, следовательно, и более стабильные аэрозоли, с меньшей вероятностью осаждаются на поверхности листьев растений.

Кроме зависимости от свойств металлов, наблюдалась тенденция к воздушному переносу металлов на определённых участках. Аэротехногенная миграция была наиболее выражена и зарегистрирована практически для всех ТМ в районе УГМК и автовокзала. Вероятно, это связано с выбросами дымовых труб сталеплавильного производства, выхлопными трубами автотранспорта, истиранием резиновых покрышек. На контрольном участке наблюдался воздушный перенос металлов, обладающих наиболее высокой склонностью к аэротехногенной миграции (Cr, Ni, Cd). Вероятно, они образуют наиболее устойчивые аэрозоли, способные к переносу на большие расстояния, что следует учитывать в исполь-

зовании растительного сырья на загородных территориях.

Результаты расчёта фактора биоконцентрации (ФБК) представлены в таблице 3. В целом, значение ФБК металлов убывало в ряду: $Zn > Cd > Mn > Cu > Ni > Pb > Cr > Fe > Co$. Для большинства металлов (Pb, Co, Fe, Cr, Ni, Cu) зарегистрировано низкое значение ФБК, не превышающее единицы. Это означает, что только малая доля ТМ переходит из почвы в растения. Фактор биоконцентрации Fe был менее единицы при анализе подорожника из района автотрассы [26]. Значение ФБК > 1 для Mn, Cd и Zn указывает на способность ТМ преодолевать барьеры защитных систем растений и накапливаться в них, даже при низких концентрациях в почвах. Ранее было обнаружено, что фактор биоконцентрации Zn для мать-и-мачехи превышает единицу в районе полигона твёрдых бытовых отходов на севере Тюменской области [27].

Расчёт ФБК указывает на различную биодоступность металлов и склонность к извлечению их из почвы. Однако, как правило, значение ФБК в городской среде было ниже, чем в контроле. Этот эффект был наиболее

Таблица 2 / Table 2
Содержание (мг/кг) тяжёлых металлов в листьях берёзы на территории г. Тюмени
Heavy metal content (mg/kg) in birch leaves (Tyumen)

Металл Metal	Контроль Control	Автовокзал Bus station	Моторный завод Engine-building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуляторный завод Battery-manufacturing plant	УГМК Metallurgical plant	Аэропорт Airport	Железнодорожный вокзал Railway station
Cu	<u>3,4±0,1</u>	<u>4,4±0,1</u>	<u>3,8±0,1</u>	<u>5,7±0,1</u>	<u>4,5±0,1</u>	<u>8,3±0,2</u>	<u>3,1±0,1</u>	<u>3,9±0,1</u>
	3,6±0,1	4,3±0,1	3,9±0,1	5,3±0,1	4,4±0,1	7,6±0,1	2,9±0,1	3,4±0,1
Zn	<u>94±2</u>	<u>82±2</u>	<u>102±2</u>	<u>154±6</u>	<u>113±3</u>	<u>138±2</u>	<u>80±2</u>	<u>83±4</u>
	90±2	86±3	94±2	137±7	106±5	90±1	82±1	53±1
Fe	<u>84±2</u>	<u>153±10</u>	<u>88±2</u>	<u>365±8</u>	<u>151±2</u>	<u>480±6</u>	<u>97±3</u>	<u>219±5</u>
	82±1	126±2	68±2	245±5	155±5	392±4	82±4	207±4
Mn	<u>272±8</u>	<u>112±3</u>	<u>412±9</u>	<u>399±12</u>	<u>112±4</u>	<u>228±2</u>	<u>303±11</u>	<u>49±1</u>
	279±10	84±1	228±2	404±11	93±2	157±2	266±10	53±4
Pb	<u>0,07±0,01</u>	<u>0,48±0,07</u>	<u>1,3±0,1</u>	<u>1,3±0,1</u>	<u>6,4±0,2</u>	<u>5,1±0,2</u>	<u>0,14±0,02</u>	<u>1,4±0,1</u>
	0,10±0,03	0,36±0,02	1,3±0,1	0,96±0,07	7,0±0,5	4,8±0,1	0,14±0,02	1,0±0,1
Cd	<u>0,20±0,02</u>	<u>0,02±0,01</u>	<u>0,15±0,01</u>	<u>0,07±0,01</u>	<u>0,06±0,01</u>	<u>0,21±0,01</u>	<u>0,08±0,01</u>	<u>≤0,01</u>
	0,16±0,01	0,01±0,01	0,18±0,02	0,08±0,02	0,05±0,01	0,12±0,01	0,10±0,01	≤0,01
Ni	<u>4,1±0,2</u>	<u>7,6±0,2</u>	<u>3,8±0,2</u>	<u>4,1±0,2</u>	<u>3,0±0,1</u>	<u>3,8±0,1</u>	<u>6,0±0,2</u>	<u>4,6±0,1</u>
	3,0±0,1	6,8±0,3	3,9±0,2	3,0±0,1	3,1±0,2	3,3±0,1	5,2±0,1	1,7±0,1
Co	<u>0,08±0,01</u>	<u>0,10±0,01</u>	<u>0,20±0,01</u>	<u>0,31±0,02</u>	<u>0,08±0,01</u>	<u>0,17±0,01</u>	<u>0,12±0,01</u>	<u>0,10±0,01</u>
	0,08±0,01	0,09±0,01	0,20±0,01	0,31±0,02	0,06±0,01	0,09±0,01	0,14±0,01	0,10±0,01
Cr	<u>0,17±0,01</u>	<u>0,89±0,05</u>	<u>0,51±0,04</u>	<u>2,5±0,1</u>	<u>0,45±0,07</u>	<u>2,6±0,1</u>	<u>0,43±0,02</u>	<u>1,2±0,1</u>
	0,10±0,01	0,57±0,12	0,32±0,11	1,3±0,1	0,47±0,04	2,1±0,2	0,34±0,05	1,0±0,1

Примечание: над чертой – не отмытые листья, под чертой – отмытые листья.
Note: above the line – unwashed leaves, under the line – washed leaves.

Таблица 3 / Table 3

Значения фактора биоконцентрации (ФБК) тяжёлых металлов в листьях берёзы г. Тюмени
Heavy metal bioconcentration factor (BCF) in birch leaves (Tyumen)

Металл Metal	Конт- роль Control	Авто- вокзал Bus station	Моторный завод Engine- building plant	НПЗ Oil refinery	Аккумуля- торный завод Battery- manufacturing plant	УГМК Metallur- gical plant	Аэропорт Airport	Железно- дорожный вокзал Railway station
Cu	0,59	0,37	0,64	0,56	0,22	0,50	0,21	0,11
Zn	5,85	3,9	7,18	5,13	2,37	2,07	2,50	0,63
Fe	0,02	0,02	0,03	0,10	0,02	0,11	0,01	0,03
Mn	0,53	0,15	0,61	1,70	0,19	0,37	0,45	0,31
Pb	0,02	0,04	0,16	0,07	0,05	0,36	0,01	0,01
Cd	16	0,58	18	4,23	0,27	1,27	1,14	0,02
Ni	0,23	0,28	0,35	0,13	0,11	0,17	0,17	0,01
Co	0,01	0,01	0,04	0,07	0,01	0,02	0,02	0,01
Cr	0,01	0,03	0,05	0,09	0,02	0,16	0,02	0,01

Примечание: ФБК – отношение содержания ТМ в отмытых листьях к кислоторастворимой форме в почве.
Note: BCF – the ratio of heavy metal content in washed leaves to acid-soluble fraction in soil.

выражен в районе с «высоким загрязнением» – железнодорожный вокзал. Полученный результат объясняется защитными механизмами растений и исключением их поступления в условиях загрязнения окружающей среды. В целом, ряд подвижности ТМ в почвах и ряд значения ФБК согласованы: низкая биодоступность Cr, Fe и Co коррелирует с их низкой подвижностью в почве, а высокая подвижность Cd и Mn в почве обеспечивает их биодоступность. Вероятно, это указывает на преимущественно пассивный транспорт ионов металлов по градиенту электрохимического потенциала в почвенном растворе. Полученный ряд значений ФБК в целом соответствует ранее описанному ряду для травянистых растений, что указывает на схожесть механизмов транслокации металлов.

Корреляционный анализ выявил положительную взаимосвязь между содержанием подвижной и кислоторастворимой форм Pb в почве с содержанием Pb в листьях берёзы ($R=0,50-0,59$), что свидетельствует о более активном корневом транспорте металла при повышении его концентрации в почве. Однако содержание Zn, Ni и Co в почве отрицательно коррелировало с их содержанием в растениях ($R=-0,59, -0,66, -0,54$ соответственно). Вероятно, это связано с действием защитных систем растений. Выявлены положительные корреляции между содержанием разных металлов в почве, как для кислоторастворимой формы, так и подвижной ($R=0,59-0,96$), например, корреляция между Zn и Ni в почве ($R=0,91$), Cr и Pb ($R=0,64$), Co и Fe ($R=0,86$), Cu и Cd ($R=0,84$). Положительные корреляции пре-

обладали и между содержанием металлов в растениях, например, между Zn и Co ($R=0,75$), Cr и Fe ($R=0,98$), Pb и Cu ($R=0,59$), Mn и Cd ($R=0,61$). Полученные корреляции указывают на комплексное антропогенное поступление ТМ в окружающую среду.

Корреляционный анализ выявил отрицательные корреляции между содержанием Zn в почве и Ni в растении ($R=-0,56$), а также между Zn в растении и Ni в почве ($R=-0,66$). Аналогичные пары корреляции получены между Ni и Cd ($R=-0,52 - -0,63$), Cr и Mn ($R=-0,50 - -0,66$). Это может свидетельствовать об избирательном поглощении металлов растениями и об антагонизме металлов: присутствие одного металла в почве приводит к подавлению транслокации другого в листья.

Заклучение

Накопление тяжёлых металлов почвами г. Тюмени относительно контроля достигало 20 раз, и в целом убывало в ряду: **Cd>Pb>Cr>Ni>Zn>Cu>Fe>Co>Mn**, отмечены превышения ПДК для Pb и Ni. Листья берёзы повислой в городской среде накапливали металлы до 95 раз относительно контроля, с наибольшим накоплением Pb и Cr: **Pb>Cr>Fe>Co>Cu>Ni>Zn>Mn>Cd**. Биодоступность металлов убывала в ряду **Zn>Cd>Mn>Cu>Ni>Pb>Cr>Fe>Co**, что в целом коррелирует с изменением подвижности тяжёлых металлов в почве в ряду **Cd>Pb>Mn>Zn>Ni>Co>Cu>Cr>Fe**. Выявлены защитные механизмы растений, что проявлялось в снижении биодоступности металлов

в условиях их накопления в почве, а также антагонизм металлов при транслокации в парах Ni и Zn, Ni и Cd, Cr и Mn. Поступление металлов в листья берёзы осуществлялось преимущественно переносом загрязнения из почвы, вклад аэротехногенной миграции металлов в основном составлял 20–30% (в отдельных случаях до 50–60%), по склонности к воздушному переносу металлы располагались в ряд: Cr>Ni>Cd≈Mn>Fe>Zn≈Pb≈Co>Cu. Осаждение металлов на поверхности листьев обратно коррелировало с летучестью их оксидов и хлоридов.

References

1. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2014. 194 p. (in Russian).
2. Rai P.K., Lee S.S., Zhang M., Tsang Y.F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environ. Int.* 2019. V. 125. P. 365–385. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.067
3. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 440 p. (in Russian)
4. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 0.25750/1995-4304-2016-1-014-019
5. Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake // *J. Hazard. Mater.* 2017. V. 325. P. 36–58. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.063
6. Berseneva A.G. The content of the heavy metals in soils on territory of the industrial enterprises in Tyumen // *Bulletin of KrasGAU*. 2015. No. 6. P. 41–44 (in Russian).
7. Shigabaeva G.N. Heavy metals in soils of several districts of Tyumen // *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*. 2015. No. 2. P. 92–102 (in Russian).
8. Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V.D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia // *J. Environ. Manage.* 2019. V. 239. P. 366–378. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095
9. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2019. V. 14. No. 1. P. 95–106. doi: 10.26471/cjees/2019/014/062
10. Meysurova A.F. Heavy metal technogenic pollution of soils in the city of Tver (Russia) // *Vestnik of Tver State University. Series: Biology and Ecology*. 2017. No. 2. P. 324–342 (in Russian).
11. Świercz A., Zającka E. Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city Skarżysko-Kamienna (Poland) with regard to land use // *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2018. V. 13. No. 1. P. 249–266. doi: 10.26471/cjees/2018/013/022
12. Pobilat A.E., Voloshin E.I. The content of nickel in agrocenosis of Krasnoyarsk region // *Trace Elements in Medicine*. 2019. V. 20. No. 1. P. 52–58 (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-52-58
13. Kodirov O., Shukurov N. Heavy metal distribution in soils near the Almalyk mining and smelting industrial area, Uzbekistan // *Acta Geol. Sin.* 2009. V. 83. No. 5. P. 985–990. doi: 10.1111/j.1755-6724.2009.00127.x
14. Semenova I.N., Biktimerova G.Ya., Ilbulova G.R., Isanbaeva G.T. Contents of heavy metals in soil around quarries Chelyabinsk region // *Modern problems of science and education*. 2015. No. 2-1. P. 561–566.
15. Kuramshina N., Rebezov M., Kuramshin E., Krasnogorskay N., Tretyak L., Somova Y., Dolmatova I., Zaitseva T., Grigoryeva I., Bakirova L. Heavy metals contamination of soil in urban areas of Southern Ural Region of Russia // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. V. 7. No. 4.42. P. 14–18. doi: 10.14419/ijet.v7i4.42.25536
16. Li X., Huang C. Environment impact of heavy metals on urban soils in the vicinity of industrial area of Baoji city, P.R. China // *Environ. Geol.* 2007. V. 52. P. 1631–1637. doi: 10.1007/s00254-006-0608-3
17. Wang Z., Qin H., Wang J. Accumulation of uranium and heavy metals in the soil-plant system in Xiazhuang uranium ore field, Guangdong Province, China // *Environ. Geochem. Health*. 2019. V. 41. No. 6. P. 2413–2423. doi: 10.1007/s10653-019-00286-7
18. Petrov V.G., Shumilova E.A., Haraldina E.A., Esenkulova S.V. Comparison of mobility for chromium substances in soil // *Bulletin of Udmurt University. Series Physics and Chemistry*. 2012. No. 2. P. 69–73 (in Russian).
19. Sukiasyan A.R., Jhangiryan T.A., Hunanyan S.A., Kirakosyan A.A. Translocation of heavy metals unto plants from the soil near the Alaverdi copper smelting enterprise // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 120–128 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2023-3-120-128
20. Kříbek B., Miková J., Knésl I., Mihaljevič M., Sýkorová I. Uptake of trace elements and isotope fractionation of Cu and Zn by birch (*Betula pendula*) growing on mineralized coal waste pile // *Appl. Geochem.* 2020. V. 122. Article No. 104741. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104741
21. Podluzhnaya A.S., Badmaeva S.E. Accumulation of heavy metals in arboreal plants of squares and parks on the right bank of Krasnoyarsk // *Bulletin of KrasGAU*. 2016. No. 8. P. 91–96 (in Russian).
22. Maslennikov P.V., Dedkov V.P., Kurkina M.V., Vashcheykin A.S., Zhuravlev I.O., Bavtruk N.V. Metal accumulation in plants of urban ecosystems // *Vestnik*

Baltiyskogo federalnogo universiteta imeny Kanta. 2015. No. 7. P. 57–69 (in Russian).

23. Petukhov A.S., Kremleva T.A., Khritokhin N.A., Petukhova G.A. Assessment of the contribution of aerotechnogenic heavy metal migration to urban environments // Ecology and Industry of Russia 2023. V. 27. No. 6. P. 62–66 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2023-6-62-66

24. Gajbhiye T., Kim K., Pandey S.K., Brown J.C. Foliar transfer of dust and heavy metals on roadside plants in a subtropical environment // Asian J. Atmos. Environ. 2016. V. 10. No. 3. P. 137–145. doi: 10.5572/ajae.2016.10.3.137

25. Gratani L., Crescente M.F., Petrucci M. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of

Quercus ilex in polluted urban areas (Rome) // Environ. Pollut. 2000. V. 110. No. 1. P. 19–28. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00285-7

26. Galal T.M., Shehata H.S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution // Ecol. Indic. 2015. No. 48. P. 244–251. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.013

27. Popova E. Accumulation of heavy metals in soil and plants adjacent to municipal solid waste disposal facility // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1145. Article No. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012021

Transformation of soil cyanobacterial-algal cenoses affected by urbanization in the South Ural urban areas

© 2025. N. V. Sukhanova¹ ORCID: 0000-0002-6130-6172, A. I. Fazlutdinova¹ ORCID: 0000-0001-7971-6690, A. V. Radygina¹ ORCID: 0000-0003-4696-2128, L. A. Gaysina^{1, 2} ORCID: 0000-0002-0920-6449¹M. Akmullah Bashkir State Pedagogical University, 3-a, Okt'yabrskoy revolucii St., Ufa, Russia, 450008, ²All-Russian Research Institute of Phytopathology, 5, Institute St., B. Vyazyomy, Odintsovo District, Moscow Region, Russia, 143050, e-mail: lira.gaisina@gmail.com

The paper presents the results of long-term studies of soil cyanobacterial-algal cenoses (CAC) in urban areas, including 18 South Ural settlements. The studied soil algae and cyanobacteria species diversity includes 487 species with varieties and forms (Chlorophyta – 231 species, Cyanobacteria – 131 species, Ochrophyta – 58, Bacillariophyta – 52, Streptophyta – 13, Euglenophyta – 2). The edaphophototrophs' biodiversity is represented by 6 divisions, 12 classes, 32 orders, 89 families, 176 genera. The CAC flora ratio of the South Ural urban areas is 5.4 for species/family, 2.6 for species/genus, and 2.1 for genus/family. Chlamydomonadaceae, Phormidiaceae, Chlorococcaceae, Nostocaceae, and Pseudanabaenaceae are the top five families by the number of species. They account for 33% of the total number of species. We identified groups of frequently occurring algae and cyanobacteria species in the South Ural soil biotopes exposed to recreational or technogenic stress. The CAC taxonomic structure of the settlements in the South Ural forest, forest-steppe, and steppe zones and their mountain counterparts (while maintaining zonal features), has a significant similarity due to the leveling of soil and climatic conditions in cities and synanthropization effect accompanied by introduction of anthropogenically disturbed habitat species into the CAC. We identify the patterns of CAC formation in urban ecosystems, and develop a scheme of CAC transformation in South Ural urban areas. General patterns are associated with changes in the algae and cyanobacteria species diversity and other CAC characteristics with an increase in anthropogenic pressure, as well as with gradual transformation of zonal CAC into azonal ones with subsequent disappearance of autotrophic microbiota. Particular features result from the predominance of one of the leading anthropogenic factor (technogenic pollution or recreational stress). The persistence of *Hantzschia amphioxys*, *Vischeria magna*, *Botrydiopsis eriensis*, etc. decreases with increasing recreational stress, but the persistence of *Microcoleus autumnalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Luticola ventricosa*, etc. increases. In other words, when the role of some species is weakened, the importance of others increases.

Keywords: microphototrophs, edaphophototrophs, pollution, urban ecosystems, synanthropization, microbiotopes, anthropogenic factors.

УДК 582.232/.275-152.6

Трансформация почвенных цианобактериально-водорослевых ценозов городов Южно-Уральского региона под воздействием урбанизации

© 2025. Н. В. Суханова¹, д. б. н., доцент, зав. кафедрой, А. И. Фазлутдинова¹, к. б. н., доцент, А. В. Радыгина¹, студент, Л. А. Гайсина^{1, 2}, д. б. н., доцент, научный руководитель сектора научно-технической интеграции,

¹Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 450008, Россия, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, д. 3-а,

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, 143050, Россия, Московская область, Одинцовский район, р. п. Большие Вяземы, ул. Институт, д. 5, e-mail: lira.gaisina@gmail.com

В статье представлены результаты многолетних исследований цианобактериально-водорослевых ценозов (ЦВЦ) почв урбанизированных территорий, включающих 18 населённых пунктов Южно-Уральского региона (ЮУР). Ви-

довое разнообразие водорослей и цианобактерий почв изученных территорий включает 487 видов с разнообразными и формами (Chlorophyta – 231 вид, Cyanobacteria – 131 вид, Ochrophyta – 58, Bacillariophyta – 52, Streptophyta – 13, Euglenophyta – 2). Биоразнообразие эдафотрофов населённых пунктов ЮУР представлено 6 отрядами, 12 классами, 32 порядками, 89 семействами, 176 родами. Коэффициент пропорции флор для ЦВЦ урбанизированных территорий ЮУР вид/семейство составляет 5,4; вид/род – 2,6; род/семейство – 2,1. В пятерку ведущих по числу видов семейств входили Chlamydomonadaceae, Phormidiaceae, Chlorococcaceae, Nostocaceae, Pseudanabaenaceae, на них приходится 33% от общего количества видов. Выделены группы часто встречающихся видов водорослей и цианобактерий в почве биотопов ЮУР, подверженных рекреационной нагрузке, либо техногенному загрязнению. Таксономическая структура ЦВЦ населённых мест лесной, лесостепной и степной зон и их горных аналогов ЮУР при сохранении зональных особенностей имеет значительное сходство, обусловленное нивелированием почвенных и климатических условий в городах, влиянием процессов синантропизации, сопровождающихся внедрением в ЦВЦ видов антропогенно-нарушенных местообитаний. Выявлены закономерности формирования ЦВЦ в городских экосистемах, разработана схема трансформации ЦВЦ урбанизированных территорий ЮУР. Общие закономерности связаны с изменением видового разнообразия водорослей и цианобактерий и других характеристик ЦВЦ при возращении антропогенной нагрузки и постепенной трансформации зональных ЦВЦ в азональные с последующим исчезновением автотрофной микробиоты. Частные особенности возникают в результате преобладания одного из ведущих антропогенных факторов (техногенного загрязнения или рекреационной нагрузки). При увеличении рекреационной нагрузки уменьшается постоянство *Hantzschia amphioxys*, *Vischeria magna*, *Botrydiopsis eriensis* и др., но увеличивается постоянство *Microcoleus autumnalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Luticola ventricosa* и др., то есть при ослаблении роли одних видов увеличивается значение других.

Ключевые слова: микрфототрофы, эдафототрофы, загрязнение, городские экосистемы, синантропизация, микробиоты, антропогенные факторы.

As a result of long-term anthropogenic stress observed over many centuries, the natural environment in cities is transformed into an urbanized one. Large and small cities, as well as other settlements, affect all components of the biota, including in the soil [1]. An integral component of terrestrial ecosystems – microscopic algae and cyanobacteria – play a significant role in maintaining the stability of anthropogenically disturbed ecosystems, which are characterized by technogenic pollution, as well as a significant degree of disturbance of the soil and vegetation cover. Urban soils (urbozems) are mostly compacted due to high recreational stress, soil horizons are mixed with household and construction waste. There is an increased content of heavy metals, oil products, reagents used to clear roads and sidewalks from snow and ice. The fertility of urbozems is reduced due to regular removal of plant residues; the acid-base balance of these soils changes towards alkalization. However, a short life cycle, microscopic size, autotrophic nutrition, the ability of cyanobacteria to fix nitrogen and many other features of microphototrophs allow them to exist in heavily transformed urban soils. They form the primary production, stimulate the soil self-purification and the vital activity of other soil microorganisms, and also prevent erosion.

Recently, there has been an increased interest in the study of soil algae and cyanobacteria in cities. The biodiversity of terrestrial algal flora of cities and their environs in the Russian Federation and neighboring countries was analyzed in Ufa [2–4], Izhevsk [5], Novosibirsk [6, 7], Krasnoyarsk [8], Kirov [9, 10, 11], Sterlitamak

[12], Ishimbay [13], Neftekamsk [14], Apatity [15], Usolye-Sibirskoye [16], Kiev [17], Magnitogorsk [18] and Gomel [19]. Cyanobacterial-algal floras were used to assess the structural and functional changes in soils under anthropogenic stress [20, 21]. Microphototrophs were used as bioindicators of the sanitary and hygienic status of the soil cover [22], as test objects in assessing the toxicity of soil and snow, as well as the atmosphere status in cities [23–26]. At the same time, information on the biodiversity of algae and cyanobacteria in the soils of urban areas of the South Ural Region (SUR) is insufficient and requires further study.

The aim of this work was to analyze the patterns of cyanobacterial-algal cenoses (CAC) forming in urban ecosystems and to develop a scheme of the CAC in urban territories of the SUR.

Research materials and methods

The study is a summary of the results of a 25-year study of the CACs in the cities of the South Urals. The work is based on the analysis of more than 700 soil samples collected in 18 cities and other settlements and in areas of zonal vegetation in their vicinity (Fig. 1). The studied urban territories were located in different natural and climatic zones: forest, forest-steppe and steppe. According to the longitudinal gradient, the studied areas belonged to the Southern Cis-Urals, Southern Urals, and Southern Trans-Urals.

The urban environment is a mosaic space. The typification of urban biotopes is diverse and largely depends on the object of study. In order to obtain a more complete picture of the CAC forma-

tion in urban ecosystems, we collected samples in the following habitats (biotopes) (Table 1):

1. Roadsides and lawns along highways. These areas were characterized by varying degrees of pollution, which depended on ventilation conditions, terrain, traffic intensity, and age of the lawn.

2. Parks, squares, and forest parks exposed to anthropogenic stress. They were characterized by a moderate degree of persistent pollution.

3. Railway embankments approaching and inside cities, as well as at enterprises, and tram tracks. These areas were characterized by a high level of persistent pollution.

4. Yards, vacant lots, school grounds, kindergartens, playgrounds, and sports grounds. These habitats were characterized by a high level of recreational stress and a variety of microbiotopes with different physicochemical and hydrothermal properties.

5. Areas of industrial enterprises, industrial sedimentation tanks, and landfills were characterized by a high level of persistent pollution.

6. Industrial waste dumps of the Sibay Branch of JSC Uchalinsky Mining and Processing Plant (UMPPSB) were characterized by a toxic mineral substrate, constant release of pollut-

ants during blasting operations with subsequent concentration in soils in the surrounding area.

7. Salt marshes in the vicinity of Sibay were characterized by a chloride-sulphate type of salinization and neutral pH values.

8. Zonal forest, forest-steppe and steppe areas near settlements. These areas were subject to limited impact of emissions from urban industrial enterprises, however, the level of pasture and recreational load could vary.

These habitats were combined into zones that are usually distinguished in the city:

– residential zone – place of residence of the population (habitat 4);

– industrial zone – territories where the main industrial enterprises are located (5, 6);

– recreational zone – place of concentration of natural objects (2, 7, 8);

– transport zone – this is the place of unification of all types of transport (automobile, railway and electric transport) within the city limits (1, 3).

The work used traditional geobotanical and soil-algal methods. The species were determined by the methods of soil cultures with fouling glasses [27, 28], aquatic cultures using soil extract, sowing fine soil (melkozem) on moistened agarized Bold medium in Petri dishes.

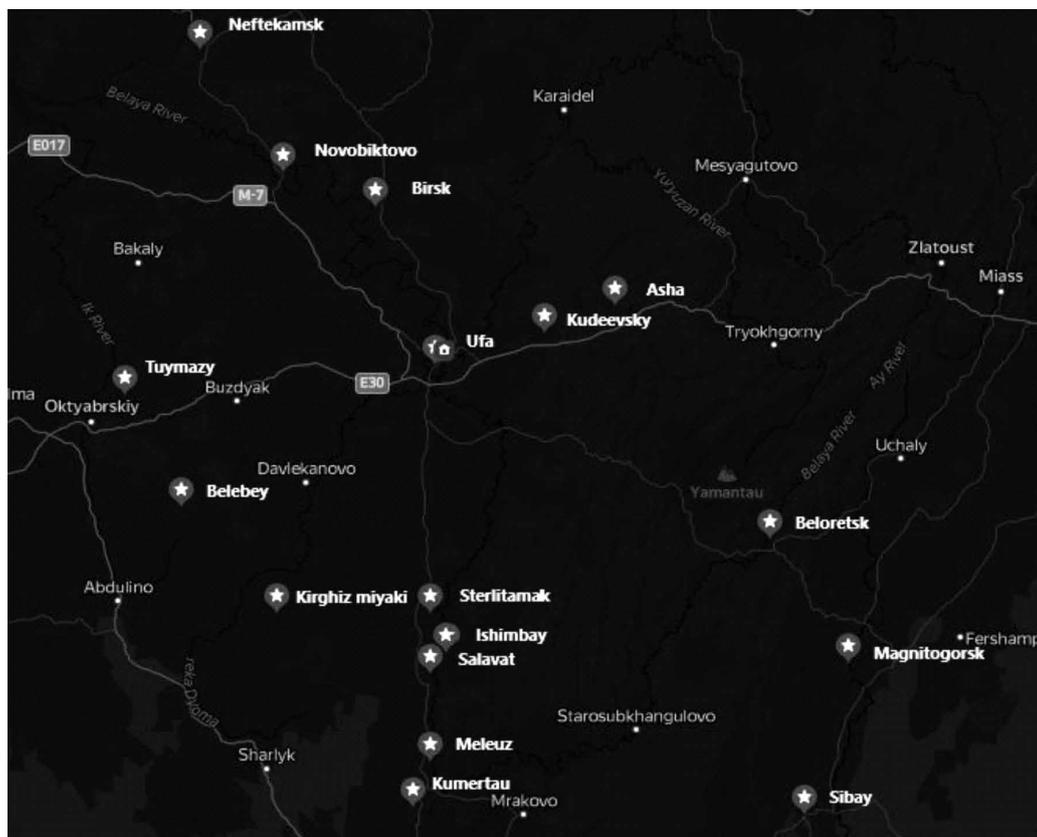


Fig. 1. Soil sampling sites (marked with an asterisk)

Table 1

Representation of biotopes in the studied settlements of the South Ural region

Locality	Biotope							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Neftekamsk	+	+	-	+	-	-	-	+
Birsk	+	+	-	+	-	-	-	+
Novobiktovo	+	-	-	+	-	-	-	+
Beloretsk	+	+	-	-	-	-	-	+
Asha	+	+	+	+	+	-	-	+
Ufa	+	+	+	+	+	-	-	+
Tuymazy	+	+	-	-	-	-	-	+
Belebey	+	+	-	+	-	-	-	+
Kudeevsky	+	+	-	+	-	-	-	+
Oktyabrskaya	+	-	-	+	-	-	-	+
Sterlitamak	+	+	-	+	-	-	-	+
Ishimbay	+	+	-	-	-	-	-	+
Salavat	+	+	-	-	-	-	-	+
Kyrgyz-Miyaki	+	+	-	-	-	-	-	+
Meleuz	+	+	-	-	-	-	-	+
Magnitogorsk	+	+	+	+	+	-	-	+
Sibay	+	+	+	+	+	+	+	+
Kumertau	+	+	-	-	-	-	-	+

Note. Biotopes 1–8 – designations are given in the text. A dash indicates the absence of a biotope.

To identify the species of algae and cyanobacteria, we used modern summaries and identification guides [29–36]. The structure of taxa and names of algae and cyanobacteria species, the system of higher taxonomic units at the division level are presented according to the AlgaeBase (<http://www.algaebase.org/>) as of August 2022. We accepted the names of the taxa Streptophyta and Charophyta, Euglenozoa and Euglenophyta as synonyms.

The abundance of algae and cyanobacteria was assessed on fouling glasses according to a 15-point scale [37]. During the syntaxonomic analysis, to each species it was assigned its own rank by transforming the abundance scale of R.R. Kabirov into the abundance scale of Braun-Blanquet: r – the sum of the abundance points on the fouling glass was equal to 1; + – 2 points; 1 – 3–6 points; 2 – 7–11 points; 3 – 12–13 points; 4 – 14 points; 5 – 15 points. When conducting the syntaxonomic analysis, the results were processed using the traditional method of phytosociological tables [38–40].

The rank of leading family was assigned to those families that included a number of species above average.

Results and discussion

During the study, 487 species of microphototrophs (including varieties and forms) were

found in the soils of the studied settlements and their environs of the SUR: 231 species of Chlorophyta (170 – Chlorophyceae, 1 – Pedinophyceae, 55 – Trebouxiophyceae, 5 – Ulvophyceae), 131 species of Cyanobacteria (131 – Cyanophyceae), 13 species of Streptophyta (1 – Chlorokybophyceae, 5 – Zygnematophyceae, 7 – Klebsormidiophyceae), 58 species of Ochrophyta (48 – Xanthophyceae and 10 – Eustigmatophyceae), 52 Bacillariophyta (52 – Bacillariophyceae), 2 species of Euglenophyta (2 – Euglenophyceae).

The biological diversity of microphototrophs in the SUR urbanized areas include 6 divisions, 12 classes, 32 orders, 89 families, and 176 genera. The flora proportion coefficient for the CACs of SUR urban area was: species/family – 5.4; species/genus – 2.6; genus/family – 2.1. The ratio of Cyanobacteria/Chlorophyta+Streptophyta was 0.54, Cyanobacteria/Ochrophyta – 2.28. The family Chlamydomonadaceae was the leader in the number of species. The leading families also included four families of Cyanobacteria, three families of Chlorophyta, one family of Ochrophyta, and one family of Bacillariophyta (Table 2).

The analysis of the CAC species composition in the SUR settlements showed a significant diversity of soil microscopic phototrophs with a significant predominance of Chlorophyta and

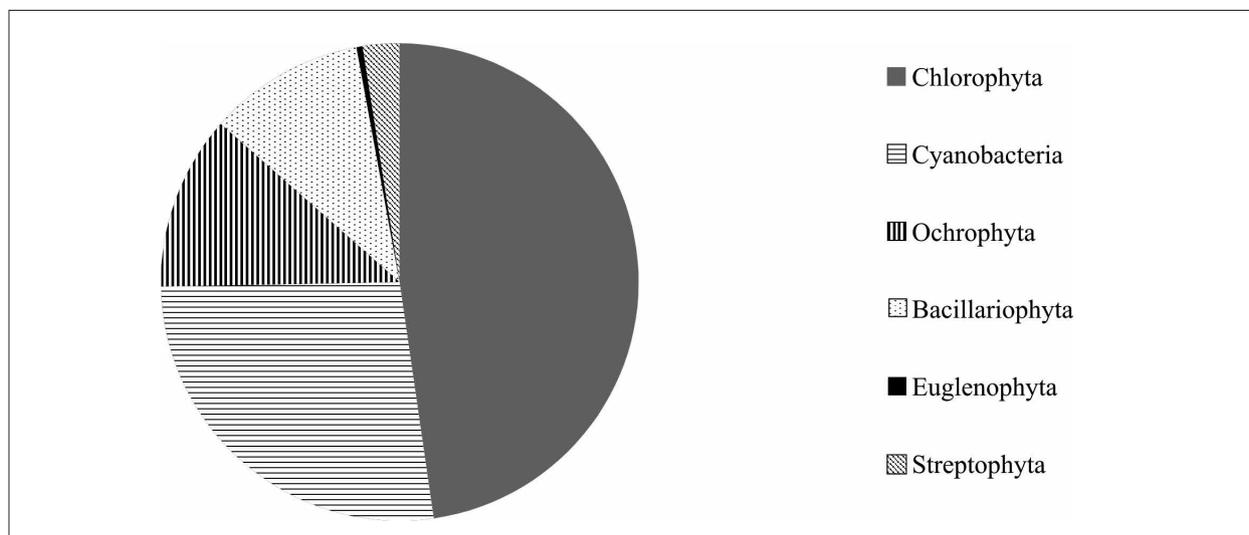


Fig. 2. Representation of different systematic groups of soil phototrophs in the South Ural settlements and their surroundings

Table 2

Families leading by the number of species in the flora of edaphophototrophs of the South Ural studied settlements

Rank	Families	Number of species
1	Chlamydomonadaceae	54
2	Phormidiaceae	33
3	Chlorococcaceae	28
4	Nostocaceae	27
5	Pseudanabaenaceae	21
6	Pleurochloridaceae	17
7	Oscillatoriaceae	16
7	Naviculaceae	16
8	Chlorellaceae	14
9	Prasiolaceae	13

Cyanobacteria. A similar picture is characteristic of the soils of a significant number of cities in the Republic of Bashkortostan [2, 12, 41, 42]. In accordance with the data of the review of zonal soil algae of the steppe and forest-steppe Bashkir Cis-Urals [43], in the composition of the CAC soil phototrophs of the SUR urban territories, as well as in zonal soils, Chlorophyta was the most numerous group (Fig. 3). At the same time, their share in the soils of urban territories was noticeably higher compared to zonal soils (increased from 37.8% (zonal soils) to 41.7%, respectively).

The biodiversity of microphototrophs in urbanozem was significantly higher than the diversity of zonal soils [43]. This is probably due to the increase in the those for habitats with a certain set of environmental conditions as a result of human activity and the formation of new biotopes for algae and cyanobacteria.

The Cyanobacteria/(Chlorophyta+Streptophyta) ratio for the CAC of settlements was 0.54, while for virgin soils of the steppe and forest-steppe zones of the Cis-Urals this indicator was 1.06 [43]. In the flora of soil phototrophs of anthropogenically disturbed areas, a decrease in the proportion of Ochrophyta (a combination of Xanthophyceae and Eustigmatophyceae) and Cyanobacteria was noted, relative to zonal soils. Thus, the flora of edaphophototrophs of urban areas underwent significant changes, while remaining zonally determined. These changes were reflected in the number of individual systematic groups of the studied soil microorganisms in the cities and other settlements.

In the soil samples of urban areas, the proportion of species found in only one sample was twice as high as in zonal soils [43] and amounted to 141 species together with intraspecific taxa. For the SUR settlements, the indicators of flora

proportion were noticeably lower as compared to zonal soils. In particular, for zonal soils, the species/family ratio was 7.0 [43], while for urban areas this indicator was 5.4.

A study of local CACs of a separate settlement (Magnitogorsk, Chelyabinsk Region) showed that a large variety of CACs is formed on its territory, in which individual taxa of algae and cyanobacteria play a certain role in urban ecosystems (Fig. 4). With pollution by heavy metals, Chlorophyta prevailed in biotopes, while with soil compaction or alkalization, the diversity of Cyanobacteria increased.

The composition of multi-species families in urban areas changed significantly. If in the

zonal soils of the Bashkir Cis-Urals the Oscillatoriaceae was characterized by the greatest diversity [43], then in urban soils it was the Chlamydomonadaceae. Of the five leading families for virgin soils, Pleurochloridaceae and Naviculaceae dropped out, and the Nostocaceae and Pseudanabaenaceae appeared instead. The ten leading families of edaphophototrophs in the settlements of the South Urals united almost half of the identified species (49.6%) (Table 2). The first five families included 33% of the total number of species. In addition to the families of Cyanobacteria and Chlorophyta, the list of leading families also included the families of Ochrophyta and Bacillariophyta.

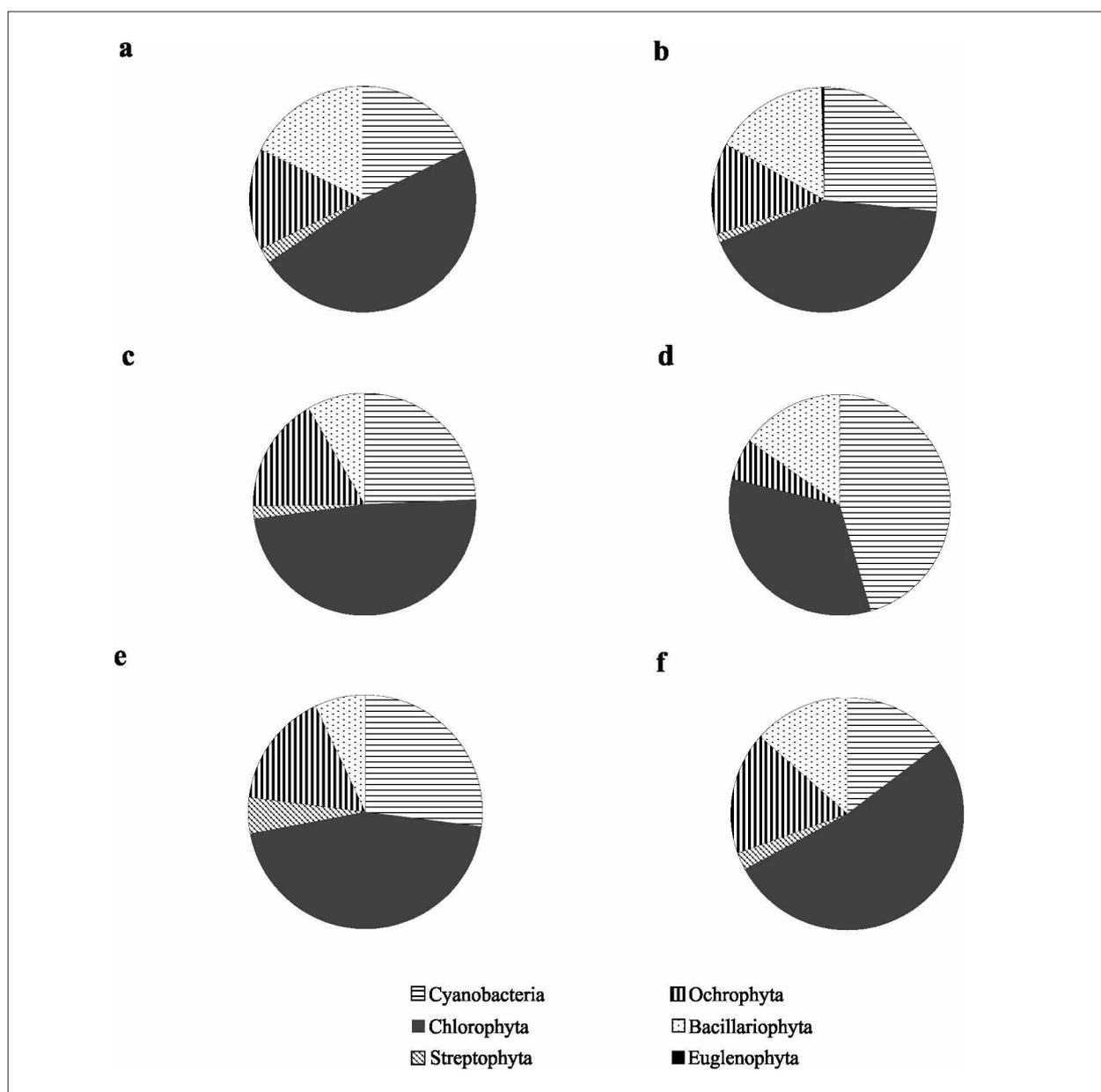


Fig. 3. The ratio of species by divisions in the soil of the South Ural studied cities: a – Neftekamsk, b – Ufa, c – Kumertau, d – Magnitogorsk, e – Sibay, f – Beloretsk

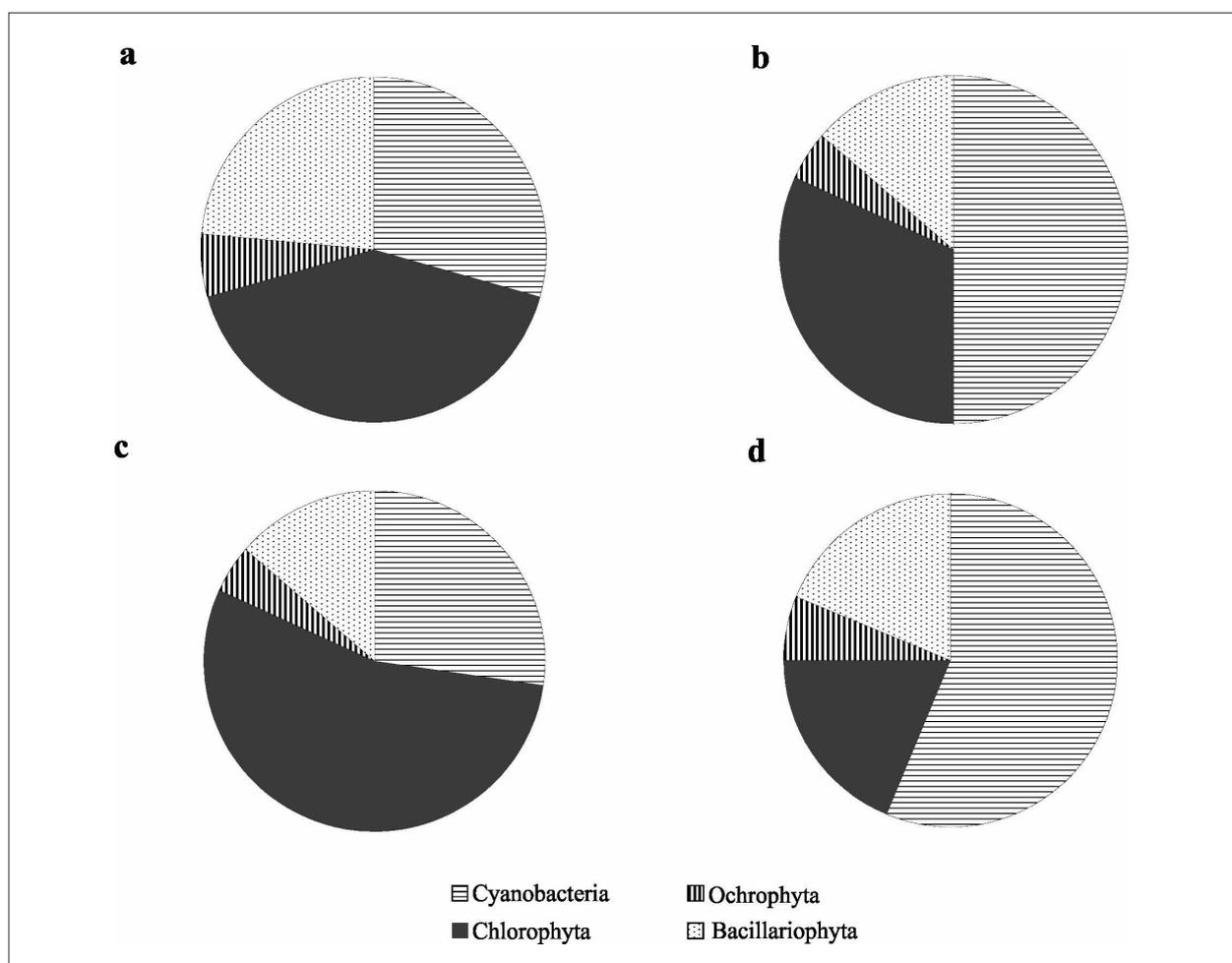


Fig. 4. Distribution of species by divisions in the soil of Magnitogorsk: a – Roadside lawns, b – Veterans Park, c – Magnitogorsk Iron and Steel Works, d – Magnitogorsk Cement Plant

Table 3

The leading families by number of species in the soil of South Ural biotopes, exposed to recreational stress

Leading families	Zonal sites of the vicinity of studied settlements			Forest parks, parks, public gardens			Biotopes of the residential area		
	F	F/s	S	F	F/s	S	F	F/s	S
Chlamydomonadaceae	1	1	1	1	1	2	2	2	1
Phormidiaceae	4	2	1	4	2	1	1	1	2
Chlorococcaceae	3	3	2	3	5	3	–	5	3
Pseudanabaenaceae	4	5	6	–	4	5	–	4	–
Prasiolaceae	4	–	5	4	–	5	2	–	1
Nostocaceae	–	1	4	2	3	6	–	2	–
Pleurochloridaceae	2	4	3	–	6	4	–	–	–
Bracteacoccaceae	4	–	–	5	–	–	–	–	–
Trebouxiaceae	4	–	–	5	–	–	–	–	–
Chlorellaceae	–	–	–	5	–	–	–	–	–
Bacillariaceae	–	–	–	5	–	–	–	–	–
Diadesmidaceae	4	–	–	5	–	–	2	5	5
Naviculaceae	–	6	–	–	5	–	2	3	4
Microcoleaceae*	–	–	–	–	–	–	–	5	5

Note for Tables 3 and 5: F – forest zone, F/s – forest-steppe zone, S – steppe zone, * – the family is leading only for these types of biotopes; a dash means – not detected.

Table 4

Group of soil algae and cyanobacteria species frequently occurring in South Ural biotopes affected by recreational stress

Taxa	City vicinities	Forest parks and parks	Residential area biotopes
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenberg) Grunow	V ⁵	IV ⁵	III ⁴
<i>Microcoleus autumnalis</i> (Gomont) Strunecky, Komárek & J.R.Johansen	III ⁴	III ⁵	III ⁵
<i>Bracteacoccus minor</i> (Schmidle ex Chodat) Petrov	IV ⁵	V ⁵	I
<i>Vischeria magna</i> (J.B.Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl	IV ⁵	III ⁵	I ³
<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kützing) P.C. Silva, K.R.Mattox & W.H.Blackwell	III ³	III ⁴	II ⁴
<i>Luticola mutica</i> (Kützing) D.G.Mann	III ⁴	III ⁵	III ⁵
<i>Microcoleus autumnalis</i> (Gomont) Strunecky, Komárek & J.R.Johansen	I ³	III ⁴	III ⁵
<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Gomont) Anagnostidis & Komárek	I ⁴	III ⁵	III ⁵
<i>Myrmecia bisecta</i> Reisingl	III ³	I ³	III ³
<i>Botrydiopsis eriensis</i> J.W.Snow	IV ⁵	III ⁵	I ³
<i>Dictyococcus varians</i> Gerneck	IV ⁴	III ⁴	III ³
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	I	III ⁵	III ⁴
<i>Fistulifera pelliculosa</i> (Kützing) Lange-Bertalot	I ⁵	III ⁵	III ⁴
<i>Luticola ventricosa</i> (Kützing) D.G.Mann	I	II ⁵	III ⁵
<i>Desmonostoc muscorum</i> (Bornet & Flahault) Hrouzek & Ventura	I	II ⁴	III
<i>Pseudophormidium hollerbachianum</i> (Elenkin) Anagnostidis	I ⁴	I ⁵	III ⁵
<i>Pleurastrum terricola</i> (Bristol) D.M.John	I	I ³	III ⁵
<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Meneghini	III ⁵	II ⁵	I ⁵
<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) P.C.Silva	II	III ⁵	I
<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korshikov	III ⁴	II ⁵	I
<i>Chl. elliptica</i> Korshikov	III ⁵	II ⁵	I
<i>Chl. oblongella</i> J.W.G.Lund	III ⁵	I ⁵	I

Note for Tables 4 and 6: Roman numerals indicate persistence classes; Arabic numerals indicate maximum abundance on the Brown-Blanquet scale. Color indicates groups of species of high constancy and abundance.

The largest share of species diversity fell on Cyanobacteria (20.1%) and Chlorophyta (22.6%). The total contribution of Ochrophyta (3.5%) and Bacillariophyta (3.3%) was 6.8%.

The studied biotopes of the SUR settlements can be divided into two groups according to the most significant anthropogenic factor affecting the CAC forming.

1. The leading factor is the recreational stress (Table 3, 5).

2. The leading factor is the technogenic stress (Table 4, 6).

According to Table 3, Chlamydomonadaceae and Phormidiaceae were the leading families in terms of number of species in biotopes affected by recreational stress. The exception were zonal

areas in the vicinity of urban areas and parks of cities in the forest zone, where the Phormidiaceae was in fourth place. In the biotopes of the residential zone, the leading family was Microcoleaceae, whose representatives play a major anti-erosion role in soils [44]. With an increase in the recreational load, the constancy of *Hantzschia amphioxys*, *Vischeria magna*, *Botrydiopsis eriensis* and others decreased, but the constancy of *Microcoleus autumnalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Luticola ventricosa* and others increased (Table 4); that is, with a decrease in the importance of some species, the role of others increased.

The species *Fistulifera pelliculosa*, *Myrmecia bisecta*, *Chlamydomonas gloeogama*, and *C. elliptica* were resistant to recreational pres-

Table 5

The leading families by number of species in the soil of the South Ural biotopes affected by technogenic pollution

Family	Lawns and roadsides			Tramway embankments	Railway embankments	MSW container sites	Landfill	Dumps of UMPPSB	Industrial sites
	F	F/s	S						
Chlamydomonadaceae	1	1	1	3	1	1	–	–	1
Phormidiaceae	2	3	2	1	1	2	1	–	1
Chlorococcaceae	2	6	3	4	–	3	2	2	3
Pseudanabaenaceae	4	4	5	4	2	3	–	–	2
Nostocaceae	2	2	4	2	–	–	3	–	3
Naviculaceae	3	5	7	–	–	–	–	–	–
Bacillariaceae	4	–	–	–	–	–	–	3	–
Diadesmidaceae	4	–	–	–	–	–	–	–	–
Pleurochloridaceae	–	6	–	–	–	–	–	–	–
Prasiolaceae	–	–	6	4	–	–	–	2	–
Chlorellaceae	–	–	–	–	2	–	–	1	–
Trebouxiaceae	–	–	–	–	2	3	–	–	3
Diadesmidaceae	–	–	–	–	2	3	2	–	3
Bracteacoccaceae	–	–	–	–	–	–	3	–	–
Klebsormidiaceae*	–	–	–	–	–	–	–	1	–

Note for Tables 5 and 6: UMPPSB – Uchalinsky Mining and Processing Plant JSC (Sibay branch).

sure, but responded to technogenic pollution.

In the soils of biotopes with a high degree of technogenic pollution, the positions of the leading families changed. The Chlamydomonadaceae was not among the leading families in two types of biotopes (in the overburden dumps of the UMPPSB and in solid waste landfills), and on tramway embankments this family was only the third. Cyanobacteria families – Phormidiaceae, Pseudanabaenaceae, and Nostocaceae – ranked higher compared to habitats affected by recreational stress (Table 5). Of particular interest is the high species diversity of the Klebsormidiaceae on the UMPPSB dumps. Unlike the group of sites affected by recreational load, the Microcoleaceae in this case was not among the leading ones.

Hantzschia amphioxys, *Microcoleus vaginatus*, *M. autumnalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Bracteacoccus minor* and other species formed the CAC core of habitats with a high degree of technogenic stress (Table 6). These species were resistant to both recreational load and technogenic pollution.

A comparison of the CACs in the SUR settlements with similar CACs of other natural and climatic zones showed that they were mainly characterized by a relatively high species diversity, the predominance of Chlorophyta and the important role of Cyanobacteria [5, 19, 45]. At the same time, in a number of cities, the CACs

were dominated by Cyanobacteria and had a significant diversity of Chlorophyta, for example, in the city of Kirov [46].

Based on the comparison of a group of edaphophototrophic species that have a high constancy and dominate in urban areas in the SUR and other cities [5, 18, 19, 46], we propose to distinguish a separate group of synanthropic species. Synanthropic organisms in a broad sense include plants and animals whose way of life is associated with humans, their homes, and the landscape created or modified by them [47]. Cyanobacteria *Microcoleus vaginatus*, *M. autumnalis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Nostoc punctiforme*, *Phormidium animale*, *Ph. breve*, *Ph. ambiguum* can be considered as synanthropic species. Among Chlorophyta we included *Bracteacoccus minor*, *Dictyococcus varians*, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas gloeogama*, *Stichococcus bacillaris* in the group of synanthropic species; among Streptophyta – *Klebsormidium flaccidum*; among Ochrophyta – *Botrydiopsis eriensis* and *Vischeria magna*; among Bacillariophyta – *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica*, *L. nivalis*, *L. ventricosa*. These species are cosmopolitan and highly resist to a number of environmental factors, including anthropogenic ones. For example, species of the genera *Microcoleus* and *Phormidium* are typical in technogenic habitats and are noted in samples with a high content of heavy metals near waste heaps in the south of Poland. They were isolated

from the tailings of the Valenciana mine (Guajajuato, Mexico), and reclaimed soils of the brown coal and lignite mines of Sokolov (Czech Republic) and Cottbus (Germany). They dominated in the early waste heaps of the Kansk-Achinsk coal deposit (Russia), and were a part of the “crusts” of the mine waste heaps of the Sibay branch of the Uchalinsky mine (Russia) [48].

When comparing the biodiversity of microphototrophs of settlements and zonal areas of their environs with each other, it was found that CACs significantly change under anthropogenic stress. This was reflected in the overall species diversity of soil phototrophs, the taxonomic structure of CACs, the list of leading families and other characteristics. The features of CACs of various biotopes largely depended on the type of natural and climatic zone, the localization of settlements relative to the Ural Mountains, the features of industrial development of cities, the type of plant community, the intensity of anthropogenic stress, successional changes, etc.

Based on the generalization of the data obtained during the analysis of CACs species composition, we developed a scheme for the transformation of CACs under urbanization (Fig. 5).

Conclusions

1. The biodiversity of algae and cyanobacteria in the soils of urbanized areas of the South Ural Republic was represented by 487 species with varieties and forms (Chlorophyta – 231 species, Cyanobacteria – 131 species, Ochrophyta – 58, Bacillariophyta – 52, Streptophyta – 13, Euglenophyta – 2). The CACs taxonomic structure of urban areas of the forest, forest-steppe and steppe zones and their mountain analogues of the South Ural region, while maintaining zonal features, had significant similarities due to the smoothing of soil and climatic conditions in cities, the synanthropization effect, accompanied by the introduction of species of anthropogenically disturbed habitats into the CAC.

Table 6

Group of frequently occurring algae and cyanobacteria species in the soil of the South Ural biotopes affected by technogenic pollution

Taxa	Roadside lawns	MSW container sites	Landfill	Industrial sites	Tramway and railway embankments	Dumps of UMPPSB
<i>Hantzschia amphioxys</i>	IV ⁵	IV ⁵	III ⁵	I	IV ⁴	III
<i>Microcoleus vaginatus</i> Gomont	III ⁵	III ⁴	III ⁴	IV	I ⁵	I
<i>Bracteacoccus minor</i>	III ⁴	V ⁵	III ⁵	I ⁴	III	I
<i>Klebsormidium flaccidum</i>	II ⁵	III ⁵	I	III ⁵	III ⁵	I
<i>Luticola mutica</i>	III ⁵	IV ⁵	I ⁵	II ⁴	I	I
<i>Microcoleus autumnalis</i>	III ⁵	III ⁵	III ⁴	III ⁵	IV ⁵	I
<i>Leptolyngbya foveolarum</i>	III ⁵	IV ⁴	III ⁴	III ⁵	IV ⁴	I
<i>Vischeria magna</i>	I ⁴	III	III	III ⁴	I	
<i>Botrydiopsis eriensis</i>	III ⁴	I	III	II	I	I
<i>Dictyococcus varians</i>	III ⁵	I	I ³	II	II	I
<i>Chlorella vulgaris</i>	III ⁵	I	III ³	III ⁴	I	I
<i>Luticola ventricosa</i>	III ⁵	I	I	I	I ⁴	I
<i>Luticola nivalis</i> (Ehrenberg) D.G.Mann	II ⁵	III		III ⁵	II ⁵	
<i>Pseudophormidium hollerbachianum</i>	II ⁵	IV ⁴	I	I ³	II	II
<i>Desmonostoc muscorum</i>	II ⁵	III ³	I ³	III ⁴	II	
<i>Phormidium breve</i> (Kützing ex Gomont) Anagnostidis & Komárek	I	IV ⁵	I ³	I	I	
<i>Chlorococcum infusionum</i>	I ⁵	IV	III	I		
<i>Trichocoleus cf. hospita</i>				I		III
<i>Leptolyngbya vorochiniana</i> Anagnostidis & Komárek	I ⁴			I	I	III

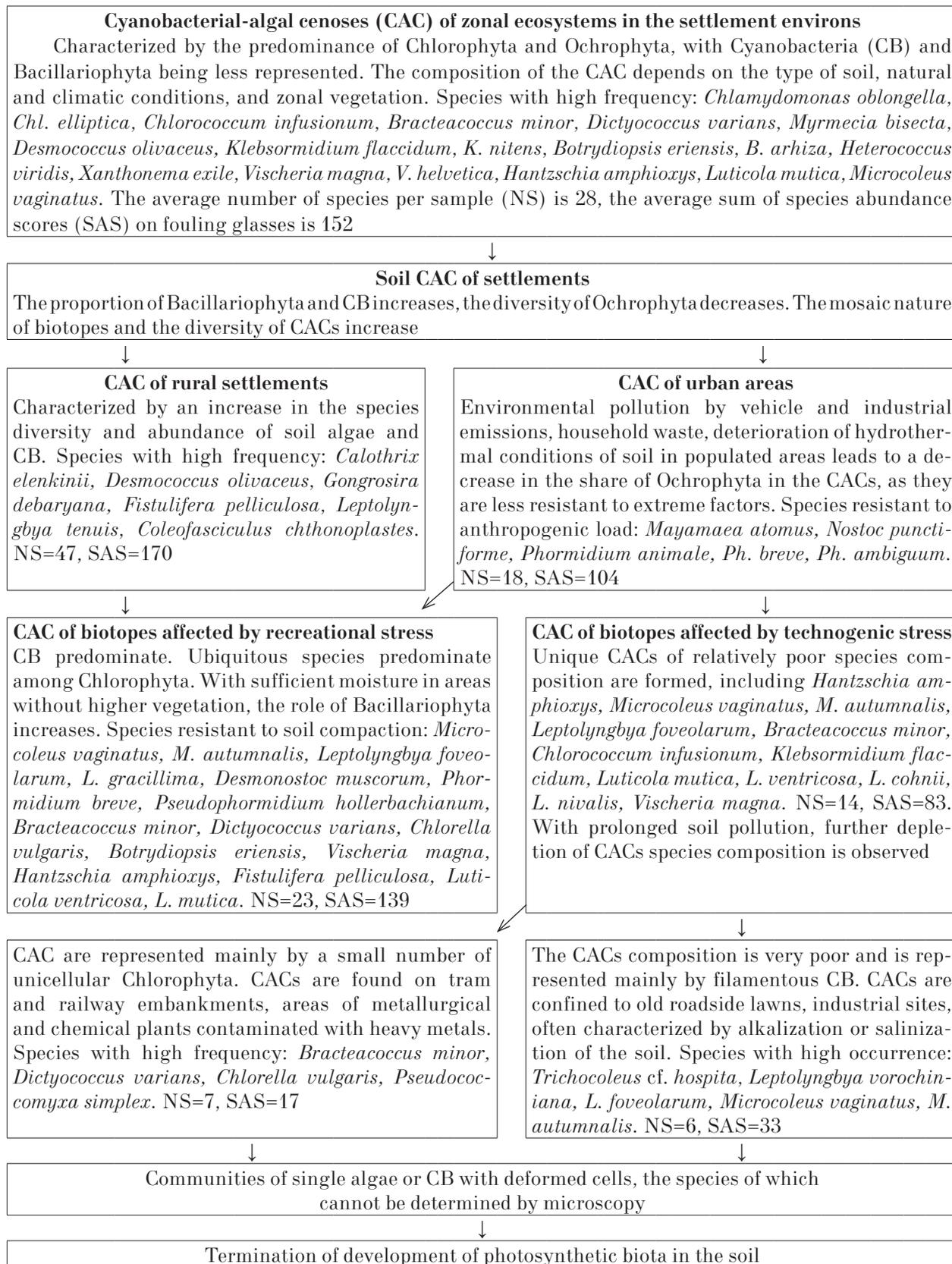


Fig. 5. Scheme of cyanobacterial-algal cenoses' (CAC) transformation under urbanization on the example of the South Ural biotopes

2. A scheme for the transformation of the CAC of populated areas was developed, including general and specific patterns of change in the CAC under anthropogenic stress. General patterns were associated with changes in algae and cyanobacteria species diversity and other CACs' features under increasing anthropogenic load and gradual transformation of zonal CACs into azonal ones with subsequent disappearance of autotrophic microbiota. Particular CACs' patterns were associated with the predominance of one of the leading anthropogenic factors (technogenic pollution or recreational stress).

The study was supported by a grant from the partner university "Mordovian State Pedagogical University named after M.E. Evseev" for 2022.

References

1. City ecology / Eds. N.S. Kasimov, A.S. Kurbatova, V.N. Bashkin. Moskva: Nauchnyy mir, 2004. 624 p. (in Russian).
2. Sukhanova N.V. Successions of soil algae from municipal solid waste dumps (Ufa, Bashkortostan) // *Botanicheskiy zhurnal*. 1996. V. 81. No. 2. P. 54–60 (in Russian).
3. Sharipova M.Yu., Dubovik I.E. Complex study of algoflora of Ufa // *Bulletin of the Bashkir State University*. 2004. No. 4. P. 45–50 (in Russian).
4. Dubovik I.E., Proskuryakova A.V., Sharipova M.Yu. Taxonomic and ecological composition of surface cyanoprokaryotic-algal macroscopic expansions in the city of Ufa and its surroundings // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2017. No. 1. P. 6–12 (in Russian).
5. Aksenova N.P., Baranova O.G. A brief review of the urban flora of edaphophilic algae and cyanoprokaryotes in Izhevsk // *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2010. No. 1. P. 27–31 (in Russian).
6. Bachura Yu.M., Blagodatnova A.G. Phytocological group structure of soil algae and cyanobacteria of urban lawn (on the example of Novosibirsk and Gomel) // *Bulletin NSPU*. 2015. V. 5. No. 3. P. 82–93 (in Russian). doi: 10.15293/2226-3365.1502.08
7. Blagodatnova A.G. Environmental assessment of soil along highways (Novosibirsk) // *Safety in Technosphere*. 2015. No. 6. P. 3–11 (in Russian). doi: 10.12737/16979
8. Trukhnitskaya S.M., Chizhevskaya M.V. Algoflora of recreational areas of the Krasnoyarsk urban ecosystem. Krasnoyarsk: KrasGAU, 2008. 134 p. (in Russian).
9. Efremova V.A., Kondakova L.V., Domracheva L.I., Elkina T.S., Vechtomov E.M. Specifics of soil "blooming" in technogenic zones of the city (on the example of Kirov city) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 4. P. 85–89 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-085-089
10. Peculiarities of urban ecosystems in the southern taiga subzone of the European Northeast / Eds. T.Ya. Ashikhmina, L.I. Domracheva. Kirov: Raduga-PRESS LLC, 2012. 282 p. (in Russian).
11. Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Pirogova O.S. Phototrophic microorganisms of urban parks // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 63–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-063-068
12. Shkundina F.B., Nikitina O.A., Gulamanova G.A. Cyanoprokaryotic-algal cenoses of cities in the forest-steppe zone of the Republic of Bashkortostan (composition, structure, use in monitoring). Ufa: RIC BashGU, 2011. 131 p. (in Russian).
13. Rakhmatullina I.V., Kuznetsova E.V. Results of studies of soil algoflora in the southern region of the Republic of Bashkortostan // *Bulletin of the Orenburg State University*. 2009. No. 6 (100). P. 594–596 (in Russian).
14. Sukhanova N.V., Fazlutdinova A.I. Soil cyanobacterial-algal cenoses of urban areas (on the example of the city of Neftekamsk of the Republic of Bashkortostan) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 2. P. 109–115 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-109-115
15. Davydov D.A., Redkina V.V. Algae and cyanoprokaryotes on naturally overgrowing ash dumps of the Apatity Thermal Power Station (Murmansk region) // *Transactions of KarRC RAS*. 2021. No. 1. P. 51–68 (in Russian). doi: 10.17076/bg1270
16. Egorova I.N., Tupikova G.S., Shergina O.V. Soil algae of forest stands of the town of Usol e-Sibirskoe and its surrounding territories (Irkutsk Oblast) // *Siberian Journal of Forest Sciences*. 2022. No. 6. P. 66–77 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20220607
17. Kostikov I.Yu., Romanenko P.O., Demchenko E.M., Darienko T.M., Mikhailyuk T.I., Ribchinsky O.V., Solonenko A.M. Soil algae in Ukraine (history and methods of follow-up, system, abstract of flora). Kiev: Phytosociocenter, 2001. 300 p. (in Ukrainian).
18. Sukhanova N.V., Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Cyanobacterial-algal cenoses of soils large industrial city // *Modern Problems of Science and Education*. 2014. No. 4. P. 518.
19. Bachura Yu.M. Cyanobacteria of anthropogenically transformed soils (on the example of the Gomel region) // *Science and innovations*. 2015. No. 5. P. 64–69 (in Russian).
20. Khaibullina L.S., Sukhanova N.V., Kabirov R.R. Flora and syntaxonomy of soil algae and cyanobacteria in urban areas. Ufa: AN RB, Gilem, 2011. 216 p. (in Russian).
21. Kabirov R.R., Chernenkova T.V., Sukhanova N.V., Shmelev N.A. Composition and structure of algocenoses of north boreal ecosystems in different relief parts in conditions of technogenic pressure // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 94–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-094-100
22. Moskvich N.P. Experience in the use of algae in the study of the sanitary state of soils // *Botanicheskiy zhurnal*. 1973. V. 58. No. 3. P. 412–416 (in Russian).

23. Kabirov R.R., Sagitova A.R., Sukhanova N.V. Development and use of a multicomponent test system for assessing the toxicity of the soil in an urban territory // Ecology. 1997. No. 6. P. 408–411 (in Russian).
24. Kabirov R.R., Sukhanova N.V., Khaibullina L.S. Estimation of atmospheric air toxicity using microscopic algae // Ecology. 2000. No. 3. P. 231–232 (in Russian).
25. Domracheva L.I. “Flowering” of the soil and patterns of its development. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS, 2005. 336 p. (in Russian).
26. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Simakova V.S. Biomonitoring capabilities of microorganisms when assessing the degree of toxicity of synthetic surfactants // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 93–98 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-093-098
27. Lund J.W.G. Observation on soil algae. 1. The Ecology, size and taxonomy of British soil diatoms // New Phytologist. 1945. V. 44. No. 2. P. 196–219. doi: 10.1111/j.1469-8137.1945.tb05033.x
28. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).
29. Komárek J., Fott B. Chlorophyceae (Grünalgen). Ordnung: Chlorococcales // Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematic und Biologie / Eds. G. Huber-Petalozzi, H. Heynig, D. Mollenhauer. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1983. 1044 p.
30. Ettl H., Gärtner G. Chlorophyta 2: Tetrasporales, Chlorococcales, Gloeodendrales // Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, J. Gerlof, H. Heynig, D. Mollenhauer. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1988. 436 p.
31. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 1: Naviculaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, J. Gerlof, H. Heynig, D. Mollenhauer. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.
32. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, J. Gerlof, H. Heynig, D. Mollenhauer. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1988. 536 p.
33. Ettl H., Gärtner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 773 p. doi: 10.1007/978-3-642-39462-1
34. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, J. Gerlof, H. Heynig, D. Mollenhauer. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 p.
35. Andreeva V.M. Terrestrial and aerophilic green algae (Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales). Sankt-Peterburg: Nauka, 1998. 349 p. (in Russian).
36. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 4: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema // Süßwasserflora von Mitteleuropa Süßwasserflora von Mitteleuropa / Eds. H. Ettl, J. Gerlof, H. Heynig, D. Mollenhauer. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1991. 437 p.
37. Kabirov R.R., Sukhanova N.V. Soil algae of urban lawns (Ufa, Bashkortostan) // Botanicheskiy zhurnal. 1997. V. 82. No. 3. P. 46–57 (in Russian).
38. Westhoff V., van der Maarel E. The Braun-Blanquet approach // Classification of plant communities / Ed. R.H. Whittaker. Dordrecht: Springer, 1978. P. 287–399. doi: 10.1007/978-94-009-9183-5_9
39. Mirkin B.M., Rozenberg G.S. Phytocenology. Principles and methods. Moskva: Nauka, 1978. 212 p (in Russian).
40. Mirkin B.M. Theoretical foundations of modern phytocenology. Moskva: Nauka, 1985. 137 p (in Russian).
41. Khaibullina L.S., Sukhanova N.V., Kabirov R.R., Solomeshch A.I. Syntaxonomy of soil algal communities in the Southern Ural. 1. Alliance *Amphora-Phormidion* all. nova hoc loco // Algologiya. 2004. V. 14. No. 3. P. 261–276 (in Russian).
42. Shkundina F.B., Zakharova E.A. Algae as an indicator of enterprise territory pollution // Ecology and Industry of Russia. 2002. No. 6. P. 26–34 (in Russian).
43. Kuzyakhmetov G.G. Algae of zonal soils of the steppe and forest-steppe. Ufa: RIO BashGU, 2006. 286 p. (in Russian).
44. Dubovik I.E. The effect of gully erosion on the diversity of algae in forest-steppe soils of the Cis-Ural region // Eurasian Soil Sci. 2004. No. 4. P. 474–479 (in Russian).
45. Trukhnitskaya S.M., Khizhnyak S.V. Peculiarities of the qualitative composition of algomicrobial complexes of urban soils // Problems of utilization and protection of natural resources in Central Siberia / Ed. V.G. Sibgatulin. 2001. No. 3. P. 123–125 (in Russian).
46. Efremova V.A., Kondakova L.V. Ecological and taxonomic structure of soil algo-groups in Kirov // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 2. P. 61–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-061-067
47. Biological Encyclopedic Dictionary / Ed. M.S. Gilyarov. Moskva: Sovetskaya encyclopedia, 1986. 831 p. (in Russian).
48. Gaysina L.A., Saraf A., Singh P. Cyanobacteria in diverse habitats // Cyanobacteria: From Basic Science to Applications / Eds. A.K. Mishra, D.N. Tiwari, A.N. Rai. Elsevier, 2018. P. 1–28. doi: 10.1016/B978-0-12-814667-5.00001-5

Специфика формирования донных биогеоценозов приливных осушек мезоприливных эстуариев Белого моря

© 2025. И. В. Мискевич, д. г. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
 Н. М. Махнович, н. с., О. П. Невцетаева, к. г. н., зав. лабораторией, с. н. с.,
 Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН,
 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., д. 36,
 e-mail: netsvetaeva.op@ocean.ru

Проведены исследования особенностей формирования донных биогеоценозов приливных осушек мезоприливных эстуариев на примере устья р. Тамицы в Онежском заливе Белого моря. Для данного моря характерно доминирование мезоприливных эстуариев, где величина наибольшего прилива колеблется в интервале 1,7–2,8 м, и которым свойственно наличие обширных приливных осушек. Такие биотопы в настоящее время крайне слабо изучены. В мае 2022 г. проведены экспедиционные работы в устьевой области р. Тамицы. На приливной осушке на пяти участках определены параметры количественного развития зообентоса и содержание органических веществ в донных отложениях, идентифицируемых по химическому потреблению кислорода. Показано, что сортировка взвесей по гидравлической крупности на акватории устьевого взморья влечёт за собой формирование сравнительно узких полос, обогащённых или обеднённых содержанием органики. Подобные полосы тянутся вдоль береговой линии и приурочены к отметкам уровня воды, близким к малой и полной водам приливного цикла. Характерная ширина полос донных отложений, обогащённых органикой с присутствием большого числа бентосных животных, составляет несколько метров. Она во многом зависит от разницы величины прилива в различные фазы лунно-солнечного цикла. Протяжённость рассматриваемых полос будет зависеть от геоморфологии устьевого взморья реки. Если ориентироваться на мезоприливные эстуарии малых рек Белого моря, то их характерная длина должна составлять от нескольких сотен метров до 1–3 км. В полосах с максимальной биомассой донных беспозвоночных доминируют двустворчатые моллюски и полихеты, в зонах с минимальной биомассой – ракообразные и некоторые виды двустворок. Рекомендуется при мониторинге загрязнения донных отложений в приливных устьях рек учитывать возможность аккумуляции на указанных полосах высокотоксичных поллютантов, таких как хлорорганические и фосфорорганические пестициды, бифенилы и ряд тяжелых металлов.

Ключевые слова: малая река, устьевая область, приливная осушка, зообентос, химическое потребление кислорода.

Specifics of the bottom biogeocenosis formation on tidal flats of the White Sea mesotidal estuaries

© 2025. I. V. Miskevich ORCID: 0000-0002-5737-4236
 N. M. Makhnovich ORCID: 0000-0002-6047-2232, O. P. Netsvetaeva ORCID: 0000-0002-5922-1399
 Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
 36, Nakhimovsky Prospekt, Moscow, Russia, 117997,
 e-mail: netsvetaeva.op@ocean.ru

We studied the peculiarities of bottom biogeocenoses formation on tidal flats of mesotidal estuaries (case-study of the Tamitsa River estuary in the Onega Bay of the White Sea). Mesotidal estuaries that dominate in the White Sea are characterized by extensive tidal flats and the highest tide of 1.7–2.8 m. Such habitats are currently very poorly understood. In May 2022, expedition works were carried out in the Tamitsa River estuary. Quantitative zoobenthos development parameters and organic matter content in benthic sediments identified by chemical oxygen demand were determined at five sites on the tidal flat. It is shown that the sorting of suspended sediments by hydraulic coarseness in the estuary water entails the formation of relatively narrow bands enriched or depleted in organic content. Such bands stretch along the shoreline and are confined to water levels close to low and high water of the tidal cycle. The characteristic width of bottom sediment bands enriched with organic matter with the presence of a large number of benthic animals is several meters. It depends largely on the difference in tidal magnitude during different phases of the moon-solar cycle. The extent of the above mentioned bands will depend on the geomorphology of the river mouth. If we focus on mesotidal estuaries of minor rivers of the White Sea, their characteristic length should be from several hundred meters to 1–3 km. Bivalves and polychaetes dominate in the bands with maximum biomass of benthic invertebrates, while crustaceans and some

species of bivalves dominate in the zones with minimum biomass. It is recommended to take into account the possibility of accumulation of highly toxic pollutants, such as organochlorine and organophosphorus pesticides, biphenyls and a number of heavy metals, in monitoring of bottom sediment pollution in tidal estuaries.

Keywords: minor river, estuary, tidal flats, zoobenthos, chemical oxygen demand.

Приливные устья рек на территории российской Арктики получили наибольшее распространение в Белом, Баренцевом и Карском морях. В Белом море в целом доминируют мезоприливные эстуарии [1, 2], на морских границах которых средняя величина прилива в сизигию (в период наибольшего прилива, когда приливообразующие силы Луны и Солнца действуют вдоль одного направления, фаза ново- и полнолуния) составляет более 1,6 м, но не превышает 2,8 м [3]. Для них характерны обширные приливные осушки – участки морского дна, обнажающиеся в фазу отлива и заливаемые водой в фазу прилива. Их ширина в малую воду прилива (при наиболее низком уровне воды) обычно составляет десятки–сотни метров, но может достигать и нескольких километров. Такие биотопы изучены очень слабо из-за недоступности судовых наблюдений. Здесь также сложно проводить пешие (маршрутные) исследования из-за быстрого заливания осушки водой в фазу прилива и наличия вязких илистых и илесто-глинистых грунтов (няши), затрудняющих продвижение человека [4].

Устьевые области малых приливных рек Белого моря активно исследуются Северо-Западным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова. Цель настоящего исследования заключается в выявлении особенностей формирования донных биогеоценозов приливных осушек мезоприливных эстуариев на примере устья р. Тамицы в Онежском заливе Белого моря.

Объекты и методы исследования

Тамица относится к так называемым малым рекам, располагается в юго-восточной части Онежского залива, имеет длину около 64 км и среднегодовой расход 7,37 м³/с. Её устье на выходе в море имеет воронкообразное расширение, близкое к форме классического приливного эстуария. Средняя величина прилива на входе в устье реки составляет 2 м, средняя максимальная (в сизигию) – 2,4 м, средняя минимальная (в квадратуру) – 1,6 м. Здесь необходимо напомнить, что квадратура – это период наименьшего прилива, когда приливообразующие силы Луны и Солнца

действуют под прямым углом друг к другу, фазы первой и последней четверти Луны.

Для донных отложений осушки р. Тамицы характерно низкое содержание алевритов и пелитов, а также преобладание песчаной фракции. В южной зоне осушки, где проводилось настоящее исследование, присутствует и каменисто-гравийная составляющая [5].

В мае 2022 г. проводились экспедиционные работы на морской границе устьевого взморья р. Тамицы в малую воду приливного цикла. Ширина приливной осушки здесь достигала более 400 м. Пять станций отбора были расположены от верхней границы приливной осушки до уреза воды с расстоянием 100 м между ними (рис.).

Наибольший уклон между станциями наблюдался в верхней части осушки (между станциями 1 и 2), минимальный – в её нижней части (между станциями 4 и 5).

На указанных станциях определяли параметры количественного развития зообентоса [6, 7] и химическое потребление кислорода (ХПК) в водных вытяжках из донных отложений. В настоящем исследовании впервые предлагается использование показателя ХПК водных вытяжек для косвенной оценки содержания органических веществ на исследуемой осушке, что обусловлено рядом причин. Во-первых, данный показатель позволяет судить

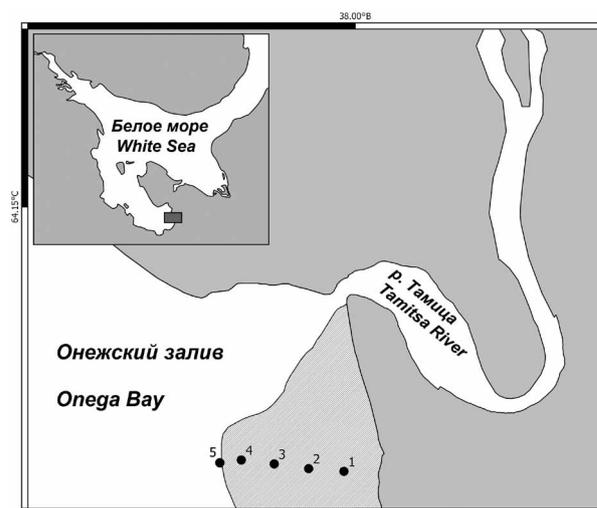


Рис. Карта-схема расположения станций (1–5) отбора проб донных отложений в устье р. Тамицы
Fig. Location map of the sediment sampling stations (1–5) at the estuary of the Tamitsa River

о содержании водорастворимых трудно-окисляемых органических веществ в донных отложениях [8]. И хотя величина ХПК не соответствует полному содержанию углерода водорастворимых органических веществ, а показывает лишь 75% от общего содержания, для целей косвенной оценки этого может быть вполне достаточно. Во-вторых, ХПК водных вытяжек довольно легко и быстро определяется в лабораторных условиях, что делает использование данного показателя удобным для массовых исследований, особенно в сравнении с более трудоёмкими методами анализа органических веществ.

Отбор гидробиологического материала производился по общепринятым методикам [9]. Применяли рамку, ограничивающую исследуемое место осушки площадью 0,25 м². Поверхностный слой грунта промывали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Полученный материал просчитывали на месте, обнаруженных животных фиксировали 70% этиловым спиртом. При определении видовой принадлежности были использованы определители [10–14].

Одновременно с поверхностного слоя осуществлялся отбор проб донных отложений, которые затем высушивались до воздушно-сухого состояния. Дальнейшее определение ХПК осуществлялось в водных вытяжках согласно ГОСТ 31859-2012 с использованием спектрофотометра HACH DR 3900 (Германия). Предварительная градуировка анализатора проводилась в диапазоне 10–160 мгО/л.

Результаты и обсуждение

Результаты изучения донных биогеоценозов, включающие параметры макрозообентоса, состав донных отложений и содержание в них общей органики, идентифицируемой по показателю ХПК, представлены в таблице.

Анализ полученной информации позволяет предположить следующее.

Максимумы содержания органических веществ в донных отложениях, биомассы, численности и биоразнообразия зообентоса зафиксированы на одних и тех же станциях, которые соответствуют уровням полной и малой вод приливного цикла, когда скорости приливных течений при смене направления снижаются до нулевого уровня. При этом должна наблюдаться наибольшая седиментация взвесей, что подтверждается увеличением на этих точках доли иловых отложений и про-

дуктов деструкции водной растительности. Последние формируются преимущественно за счёт остатков галофитов, образующих обширные заросли около речной границы устьевого взморья реки. На верхней границе приливной осушки (L=0 м) накоплению остатков водной растительности, включая водоросли (фукоиды), также способствуют ветровое волнение и прибой.

Минимумы исследуемых параметров фиксировались в точках, в которых в фазы прилива и отлива наблюдались максимальные скорости течений (0,3–0,5 м/с), способные размывать илистые и илисто-глинистые осадки. Это повлекло за собой формирование донного грунта, представленного преимущественно среднезернистым песком.

Таким образом, сортировка взвесей по гидравлической крупности на акватории устьевого взморья мезоприливного эстуария по результатам анализа проб донных отложений и визуального осмотра зоны приливной осушки влечёт за собой формирование сравнительно узких полос, обогащённых или обеднённых органическим веществом.

Наибольшего различия в локальных биогеоценозах вышеуказанных полос следует ожидать в осенний период по окончании вегетационного периода. Зимой приливные подвижки льда и отдельных льдин в вертикальном и продольном (по отношению к оси эстуария) направлениях способны разрушать сформировавшиеся полосы с наличием мелкодисперсных осадков. В частности, это происходит при оседании льда на грунт приливной осушки в квадратуру и примерзании донных отложений к его нижней поверхности. Подобная картина наблюдается в дельте р. Северная Двина [15–17]. В сизигию (через 2 недели), когда повышается приливной уровень воды на устьевом взморье реки, лёд снова всплывает, нарушая целостность и характер донного субстрата.

Как показали наблюдения, в устье р. Тамбичи в зонах (полосах) с максимальной биомассой донных беспозвоночных доминируют двустворчатые моллюски и полихеты, в зонах с их минимальной биомассой – ракообразные и некоторые виды двустворок. Доминирующие биоценозы для каждой станции указаны в таблице.

В статье [16] было высказано предположение, что экологическая катастрофа, связанная с массовым выбросом морских звёзд на западном побережье Двинского залива Белого моря в 1990 г., была обусловлена наличием на нижней границе приливной осушки аналогичной

Таблица / Table

Количественная характеристика зообентоса и ХПК водных вытяжек из донных отложений на приливной осушке эстуария р. Тамисы / Quantitative characteristic of zoobenthos and COD in aqueous extracts from bottom sediments on tidal flat of the Tamitsa River estuary

№	L, м L, m	N, экз./м ² N, ind./m ²	B, г/м ² B, g/m ²	n	Характер донных отложений The nature of the sediments	Доминирующий биоценоз Dominant biocenosis	ХПК, мгО/л COD, mgO/L
1	0	117±2	17,4±0,6	3	Среднезернистый песок с примесью гравия и остатками гниющей растительности Medium-grained sand with an admixture of gravel and the remains of decaying plants	<i>Mya arenaria</i>	62±12
2	100	6±1	4,25±0,20	1	Среднезернистый песок Medium-grained sand	<i>Macoma balthica</i>	45±13
3	200	4±1	0,24±0,03	1	Среднезернистый песок Medium-grained sand	<i>Crangon crangon</i>	44±13
4	300	76±3	50,4±0,8	4	Среднезернистый заиленный песок Medium-grained silty sand	<i>Macoma balthica</i> + <i>Mya arenaria</i>	52±10
5	400	66±1	17,0±0,7	4	Среднезернистый песок с примесью гравия и остатками гниющей растительности Medium-grained sand with an admixture of gravel and the remains of decaying plants	<i>Macoma balthica</i>	38±11

Примечание: L – расстояние от точки (станции) до начала разреза, N – численность донных беспозвоночных, B – биомасса донных беспозвоночных, n – количество видов зообентоса, ХПК – химическое потребление кислорода.
Note: L – distance from the point (station) to the beginning of the transect, N – abundance of benthic invertebrates, B – biomass of benthic invertebrates, n – number of zoobenthos species, COD – chemical oxygen demand.

полосы с большой биомассой моллюсков. Это, в свою очередь, привело к скоплению на ней морских звёзд и их последующему выбросу на берег при сильном штормовом нагоне. Данный факт говорит о возможности скопления большого количества (биомассы) донных беспозвоночных в узкой полосе прибрежной зоны моря, идущей параллельно очертаниям береговой приливной осушки.

Выше речной границы устьевого взморья на устьевом участке реки ширина приливных осушек резко снижается. Здесь в зоне локализации максимальных градиентов температуры и солёности воды, больших скоростей течений и высокой литодинамики грунта донные беспозвоночные практически отсутствуют [18].

С другой стороны, формирование высокой биомассы донных беспозвоночных в полосах может сопровождаться накоплением в иловых осадках высокотоксичных органических соединений, например, полихлорированных бифенилов (ПХБ), хлорорганических пестицидов (ХОП), нефтепродуктов, а также ряда тяжёлых металлов [19, 20]. Исследования

в данном отношении практически не проводились. Как отмечалось ранее, судовые наблюдения не могут охватывать подобные зоны приливных осушек, и на них требуется выполнение специализированных исследований.

Характерная ширина полос донных отложений, обогащённых органикой с присутствием большого числа бентосных животных, составляет несколько метров. Она во многом зависит от разницы величины прилива в квадратуру и сизигию. Протяжённость рассматриваемых полос будет зависеть от геоморфологии устьевого взморья реки. Если ориентироваться на мезоприливные эстуарии малых рек Белого моря, то их характерная длина должна составлять от нескольких сотен метров до 1–3 км.

Выводы

Проведённые исследования позволяют предположить, что на приливных осушках мезоприливных устьев рек Белого моря в безледоставный период формируются протяжённые узкие полосы донных отложений с

повышенным содержанием органического вещества, а также значительной биомассой и численностью зообентоса. Такие полосы тянутся вдоль береговой линии и приурочены к отметкам уровня воды, близким к малой и полной водам приливного цикла. При мониторинге загрязнения донных отложений в приливных устьях рек необходимо учитывать возможность аккумуляции на указанных полосах высокотоксичных поллютантов.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания по теме «Осаждообразование в современном и древнем океане – рассеянное осадочное вещество и донные отложения как геологические архивы изменения климата и природных систем ключевых районов Мирового океана, морей России и пограничной области море–суша» (№ FMWE-2024-0020).

Литература

1. Мискевич И.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Коробов В.Б., Панченко Е.Д. Формирование высокой мутности вод в малых приливных эстуариях Белого и Баренцева морей // Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр. 2022. № 4. С. 142–153.
2. Люция Белого моря (№ 1410). СПб: ГУНиО МО РФ, 1995. 336 с.
3. Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
4. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
5. Лукьянов С.А., Шварцман Ю.Г. Гранулометрический состав донных отложений устьевых зон малых рек Онежского залива Белого моря // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: «Естественные науки». 2013. № 2. С. 28–34.
6. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 5–11. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011
7. Илюшин Д.Г., Исаченко А.И., Шабалин Н.В., Мокиевский В.О. Современные методы исследования донных сообществ // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 98–104.
8. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Агрохимия и почвоведение». М: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.

9. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 191 с.
10. Флора и фауна Белого моря: иллюстрированный атлас / Под ред. А.Б. Цетлина, А.Э. Жадан, Н.Н. Марфенина. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 471 с.
11. Каталог биоты Беломорской биологической станции МГУ / Под ред. А.В. Чесунова, Н.М. Калякиной, Е.Н. Бубновой. М.: Т-во научных изданий КМК, 2008. 384 с.
12. Чертопруд М.В., Чертопруд Е.С. Краткий определитель пресноводных беспозвоночных центра Европейской России. М.: МАКС Пресс, 2003. 196 с.
13. Beukema J.J. An evaluation of the ABC-method (abundance/biomass/comparison) as applied to macrozoobenthic communities living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea // Mar. Biol. 1988. V. 99. P. 425–433. doi: 10.1007/BF02112136
14. Methods for the study of marine benthos / Eds. A.D. McIntyre, A. Eleftheriou. Blackwell, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 2005. 418 p.
15. Мискевич И.В., Котова Е.И., Нецветаева О.П. Особенности вертикальной структуры маргинального фильтра в устьях рек с устойчивым галоклином в зимний период на примере дельты Северной Двины // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 61–65. doi: 10.17513/use.37929
16. Студёнова М.А., Студёнов И.И., Чупов Д.В., Самодов А.С. Зообентос дельты реки Северная Двина // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 60–65. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-060-065
17. Артемьев С.Н., Новосёлов А.П., Левицкий А.Л. Таксономическое и видовое разнообразие макрозообентоса в Двинском заливе Белого моря // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 4. С. 308–320. doi: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.308
18. Махнович Н.М. Основные популяционные характеристики макрозообентоса Онежского берега Белого моря (весна 2021) // Экология гидросферы. 2022. № 1 (7). С. 1–10. doi: 10.33624/2587-9367-2022-1(7)-1-10
19. Шлыгин И.А. Вопросы оценки характеристик и состава грунта при выдаче разрешений на его сброс // Итоги исследований в связи со сбросом отходов в море. М.: Гидрометеиздат, 1988. С. 11–20.
20. Мискевич И.В. Гидрологические аспекты сброса сточных вод в прибрежной зоне морей западного сектора Российской Арктики // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 50–55. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-050-055

References

1. Miskevich I.V., Alabyan A.M., Demidenko N.A., Korobov V.B., Panchenko E.D. Formation of high water turbidity in small tidal estuaries of the White and Barents Seas // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 2022. No. 4. P. 142–153 (in Russian).

2. White Sea Lotiya (No. 1110). Sankt-Peterburg: GUNiO of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 1995. 336 p. (in Russian).
3. Mikhailov V.N. Principles of typification and zoning of river mouth areas (analytical review) // *Water Resources*. 2004. V. 31. No. 1. P. 5–14 (in Russian).
4. Kut'yavina T.I., Ashikhmina T.Ya. Current state and problems of monitoring of surface water bodies in Russia (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 13–21 (in Russian). doi:10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
5. Lukyanov S.A., Shvartsman Yu.G. Grane-size composition of bottom sediments of the estuarine zones of the minor rivers of the White Sea Onega Bay // *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*. 2013. No. 2. P. 28–34 (in Russian).
6. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 5–11 (in Russian). doi:10.25750/1995-4301-2019-1-005-011
7. Ilyushin D.G., Isachenko A.I., Shabalin N.V., Mokievskiy V.O. Modern methods of benthic communities research // *Engineering Survey*. 2014. No. 9–10. P. 98–104 (in Russian).
8. Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soils. Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta, 1970. 487 p. (in Russian).
9. Manual on methods for biological analysis of sea water and bottom sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 191 p. (in Russian).
10. Flora and fauna of the White Sea: illustrated atlas / Eds. A.B. Tsetlin, A.E. Zhadan, N.N. Marfenin. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 471 p. (in Russian).
11. Catalog of biota of the MSU White Sea Biological Station / Eds. A.V. Chesunov, N.M. Kalyakina, E.N. Bubnova. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 384 p. (in Russian).
12. Chertoprud M.V., Chertoprud E.S. Concise identifier of freshwater invertebrates of the center of European Russia. Moskva: MAKS Press, 2003. 196 p. (in Russian).
13. Beukema J.J. An evaluation of the ABC-method (abundance/biomass/comparison) as applied to macrozoobenthic communities living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea // *Mar. Biol.* 1988. V. 99. P. 425–433. doi:10.1007/BF02112136
14. Methods for the study of marine benthos / Eds. A.D. McIntyre, A. Eleftheriou. Blackwell, Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 2005. 418 p.
15. Miskevich I.V., Kotova E.I., Netsvetaeva O.P. Peculiarities of the vertical structure of a marginal filter in the mouth of rivers with stable halocline in winter on the example of the delta of the Northern Dvina // *Advances in Current Natural Sciences*. 2022. No. 11. P. 61–65 (in Russian). doi:10.17513/use.37929
16. Studenova M.A., Studenov I.I., Chupov D.V., Samodov A.S. Zoobenthos of the Severnaya Dvina River delta // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 60–65 (in Russian). doi:10.25750/1995-4301-2021-2-060-065
17. Artem'ev S.N., Novoselov A.P., Levitskiy A.L. Taxonomic and species diversity of macrozoobenthos in the Dvina Bay of the White Sea // *Arctic Environmental Research*. 2017. V. 17. No. 4. P. 308–320 (in Russian). doi:10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.308
18. Makhnovich N.M. The main population characteristics of macrozoobenthos of the Onega coast of the White Sea (spring 2021) // *Hydrosphere Ecology*. 2022. No. 1 (7). P. 1–10 (in Russian). doi:10.33624/2587-9367-2022-1(7)-1-10
19. Shlygin I.A. Issues of assessment of soil characteristics and composition in the issuance of discharge permits // *Results of studies in connection with marine waste discharge*. Moskva: Gidrometeoizdat, 1988. P. 11–20 (in Russian).
20. Miskevich I.V. Hydrological aspects of discharge of waste waters in the coastal zone of the seas of the western sector of the Russian Arctic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 50–55 (in Russian). doi:10.25750/1995-4301-2017-1-050-055

**Геоэкологические аспекты устойчивого развития
многофункциональных комплексов по обращению
с твёрдыми коммунальными отходами**

© 2025. Е. В. Губарь, ассистент, О. А. Самарина, к. т. н., доцент,
О. В. Тупицына, д. т. н., зав. кафедрой, В. Н. Пыстин, к. т. н., доцент,
Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244,
e-mail: e.v.gubar@mail.ru

Результаты исследования посвящены решению проблем создания (нового строительства) объектов обращения с твёрдыми коммунальными отходами (ТКО) на территории малочисленных населённых пунктов (муниципальных округов и районов) Приволжского федерального округа. Выявлены и обоснованы наиболее значимые геоэкологические параметры, обеспечивающие комплексную оценку проектирования и строительства полигонов ТКО: срок эксплуатации, мощность, вместимость полигона по неуплотнённым отходам, вместимость полигона по уплотнённым отходам. Техническими параметрами объектов проектирования является набор основных и вспомогательных сооружений, обслуживающих эксплуатацию участка захоронения отходов в соответствии с его функциональным зонированием. Сравнительная оценка геоэкологических, технико-экономических и эксплуатационных параметров строительства объекта захоронения ТКО выполнена путём разработки трёх вариантов организации участка захоронения отходов (карьерный, насыпной, комбинированный) для эталонного полигона ТКО мощностью захоронения до 30 тыс. т/год с участком складирования площадью 3 га. Степень воздействия хозяйственной деятельности на геологическую среду рассматривается от максимально возможного заглубления до отказа от заглубления участка захоронения ТКО. Полученные в результате исследования количественные параметры представляют собой критерии избыточности проектных решений в процентах от общей стоимости строительства объектов обращения с отходами. Выполненные расчёты позволили разработать интегральную систему оценки технико-экономических показателей и ресурсно-технологическую обеспеченность проектных решений по мероприятиям, реализуемым в сфере обращения с отходами потребления.

Ключевые слова: устойчивое развитие объектов по обращению с ТКО, рациональное использование земельных ресурсов, экологическая безопасность природно-техногенных систем, геоэкологическая оценка строительства объектов по обращению с ТКО.

**Geo-ecological aspects of sustainable development of multifunctional
complexes for solid municipal waste management**

© 2025. E. V. Gubar ^{ORCID: 0000-0003-0040-9466}, O. A. Samarina ^{ORCID: 0009-0007-3935-6329}
O. V. Tupicina ^{ORCID: 0000-0003-0638-2700}, V. N. Pystin ^{ORCID: 0000-0002-4027-1804}
Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya St., Samara, Russia, 443100,
e-mail: e.v.gubar@mail.ru

This study is devoted to solving the problems of creating (new construction) municipal solid waste management (MSW) facilities on the territory of small settlements (municipal districts and regions) of the Volga Federal District. The most significant geo-ecological indicators providing a comprehensive assessment of the design and construction of a MSW landfill were identified and justified. Service life, capacity, landfill capacity for non-compacted waste, and landfill capacity for compacted waste are the main indicators. The technical indicators of the design objects are a set of main and auxiliary facilities serving the operation of the waste disposal site in accordance with its functional zoning. A comparative assessment of the geo-ecological, technical, economic and operational indicators of the construction of a MSW disposal facility was carried out by developing three options for organizing a waste disposal site (quarry, bulk, combined) for a reference landfill of solid municipal waste with a disposal capacity of up to 30 thousand tons per year with a storage area of 3 hectares. The degree of economic activity effect on the geological environment is considered from the maximum possible deepening to the refusal of deepening of MSW landfill site. The quantitative parameters obtained as a result of the study represent criteria for redundancy of design solutions as a percentage of the total cost of construction of waste management facilities. The calculations made it possible to develop an integrated system for assessing technical and economic indicators and resource and technological security of design solutions for measures implemented in the sphere of consumer waste management.

Keywords: sustainable development of municipal MSW facilities, rational use of land resources, environmental safety of natural-technogenic systems, geo-ecological assessment of the construction of municipal MSW facilities.

Данное исследование направлено на изучение вопроса создания (нового строительства) объектов по обращению с твёрдыми коммунальными отходами (ТКО) на территории Приволжского федерального округа (ПФО). На сегодняшний день финансовое обеспечение создания инфраструктуры по обращению с отходами, в том числе с ТКО, реализуется полностью или частично за счёт средств бюджетной системы Российской Федерации или в результате привлечения частных инвестиций, в том числе в различных формах совместного с государством участия [1, 2]. В качестве источников возврата инвестиций выступают прямые сборы платы с потребителей за пользование объектом (услуги) и плата за доступность (фиксированные платежи) со стороны публичного партнёра (бюджета). Тарифообразование в регионах в значительной степени зависит от уровня финансовых средств, направленных на строительство объектов по обращению с ТКО [3]. Таким образом, при создании объектов обращения с отходами важнейшими ресурсно-технологическими критериями являются экономически обоснованные затраты на реализацию проектов в области обращения с отходами.

Цель настоящего исследования заключается в разработке инструмента геоэкологической оценки проектных решений строительства объектов в сфере обращения с ТКО в отношении избыточности технологических решений, реализация которых привела к значительному увеличению финансовых и временных расходов.

Объекты и методы исследования

В настоящей работе применены методы системного анализа данных, представленных в нормативно-правовых актах в сфере природопользования, территориальных схемах в области обращения с отходами, в том числе ТКО, и официально опубликованных правовых актах субъектов Российской Федерации, входящих в состав ПФО. Технические и технологические решения объектов по захоронению ТКО разработаны в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами (Федеральным законом от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ, Постановлением Правительства РФ от 12.10.2020 г. № 1657, СП 320.1325800.2017 (изм. 1), ИТС НДТ 17-2021). Расчёт плана земляных масс (картограммы) произведён в программном комплексе GeoniCS 2015. Стоимость выполнения работ по строительству

полигонов ТКО с различными технологичными решениями участков (карт) захоронения отходов определена на основании сборников единичных расценок, являющихся составной частью системы ценообразования и сметного нормирования в строительстве, действующей на территории России.

Результаты и обсуждение

Приоритетным способом обращения с ТКО на территории России до сих пор остаётся захоронение отходов. Так, на территории ПФО в среднем более 90% от общего объёма образованных ТКО направляется на полигоны, а утилизируется в среднем менее 6% (рис. 1). Это демонстрирует крайне незначительную тенденцию достижения целевых показателей национального проекта «Экология», реализующего государственную политику в природоохранной сфере.

Оценка комплексной эффективности работы регионов ПФО в сфере обращения с ТКО на основе совместного анализа целевых показателей Национального проекта «Экология» 2023 г. и сведений о количестве образования, обработки, утилизации и размещения отходов по форме 2-ТП (отходы) субъектами РФ, входящими в состав ПФО, за 2023 г. [1, 4] показала необходимость проведения риск-ориентированного прогноза достижения запланированных целевых показателей нацпроекта «Экология».

По итогам анализа территориальных схем в области обращения с отходами, в том числе с ТКО, регионов ПФО выявлена нехватка действующих объектов в муниципальных районах, недостаточная мощность существующих объектов и неполный охват обеспечения населения услугами по обращению с отходами. Это предполагает реконструкцию существующих и создание новых комплексных объектов по обработке, сортировке, утилизации, обезвреживанию отходов и захоронению неутраченных фракций.

Сегодня отходоперерабатывающая отрасль на территории ПФО развивается по трём основным направлениям:

1. Модернизация существующих комплексов по обращению с отходами и реконструкция существующих полигонов;
2. Строительство многофункциональных комплексов по обращению с отходами мощностью до 70 тыс. т/год;
3. Строительство межмуниципальных (межпоселенческих) комплексов полного

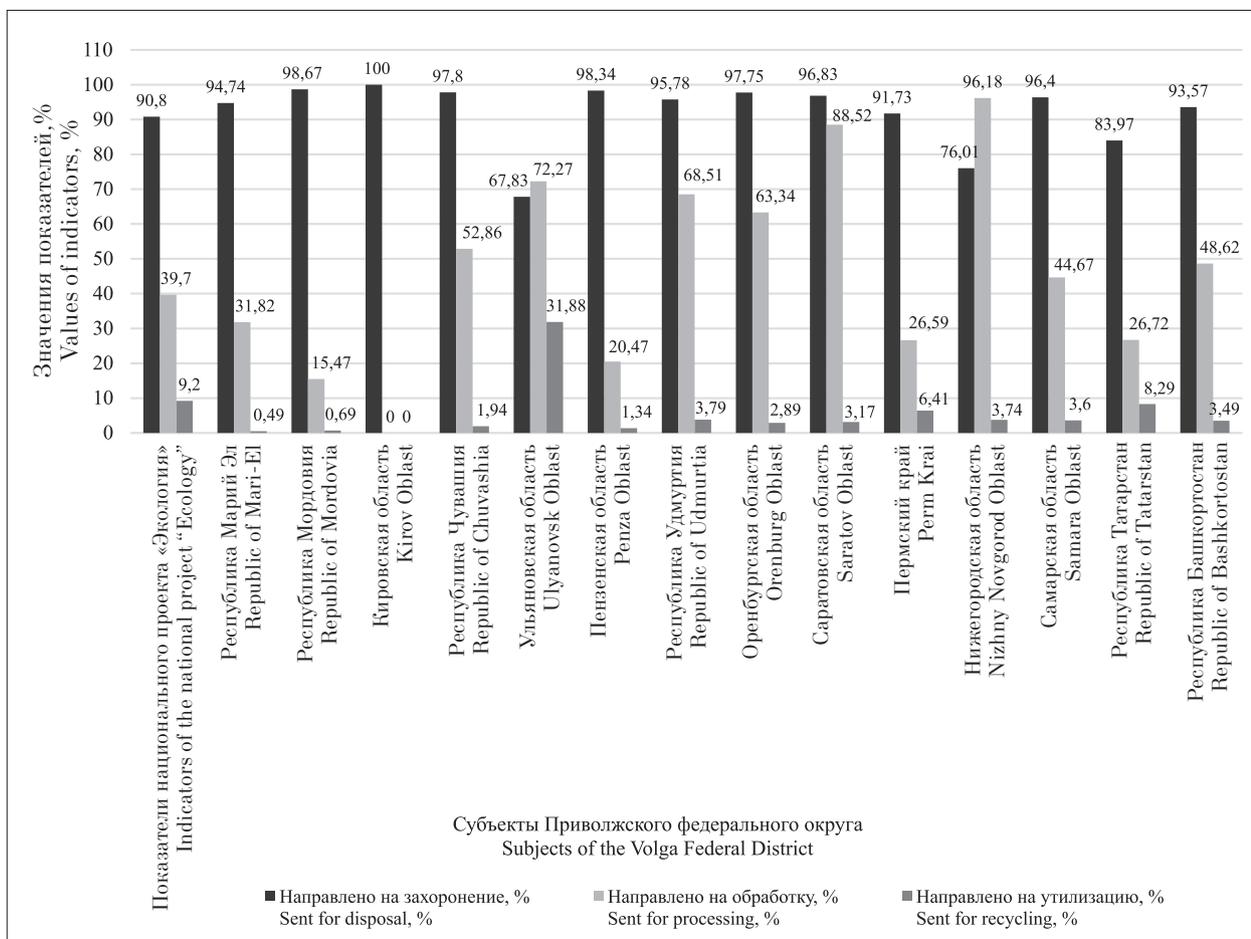


Рис. 1. Сведения о доли твёрдых коммунальных отходов (ТКО), направленных на захоронение, обработку, утилизированных, в общей массе образовавшихся ТКО на территории регионов Приволжского федерального округа [1, 4]
Fig. 1. Information on the share of solid municipal waste (MSW) sent for disposal, processing, and recycling, in the total mass of MSW generated in the Volga Federal District regions [1, 4]

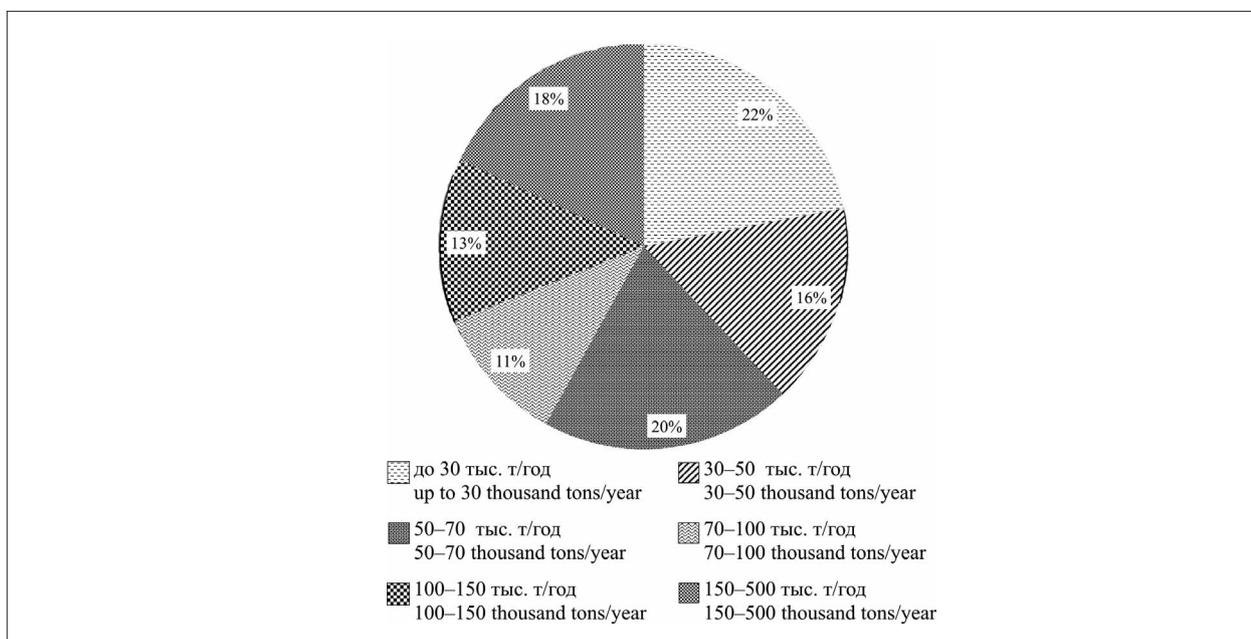


Рис. 2. Распределение перспективных объектов захоронения ТКО на территории Приволжского федерального округа (по мощностям) / **Fig. 2.** Distribution of prospective MSW disposal sites in the Volga Federal District (by capacity)

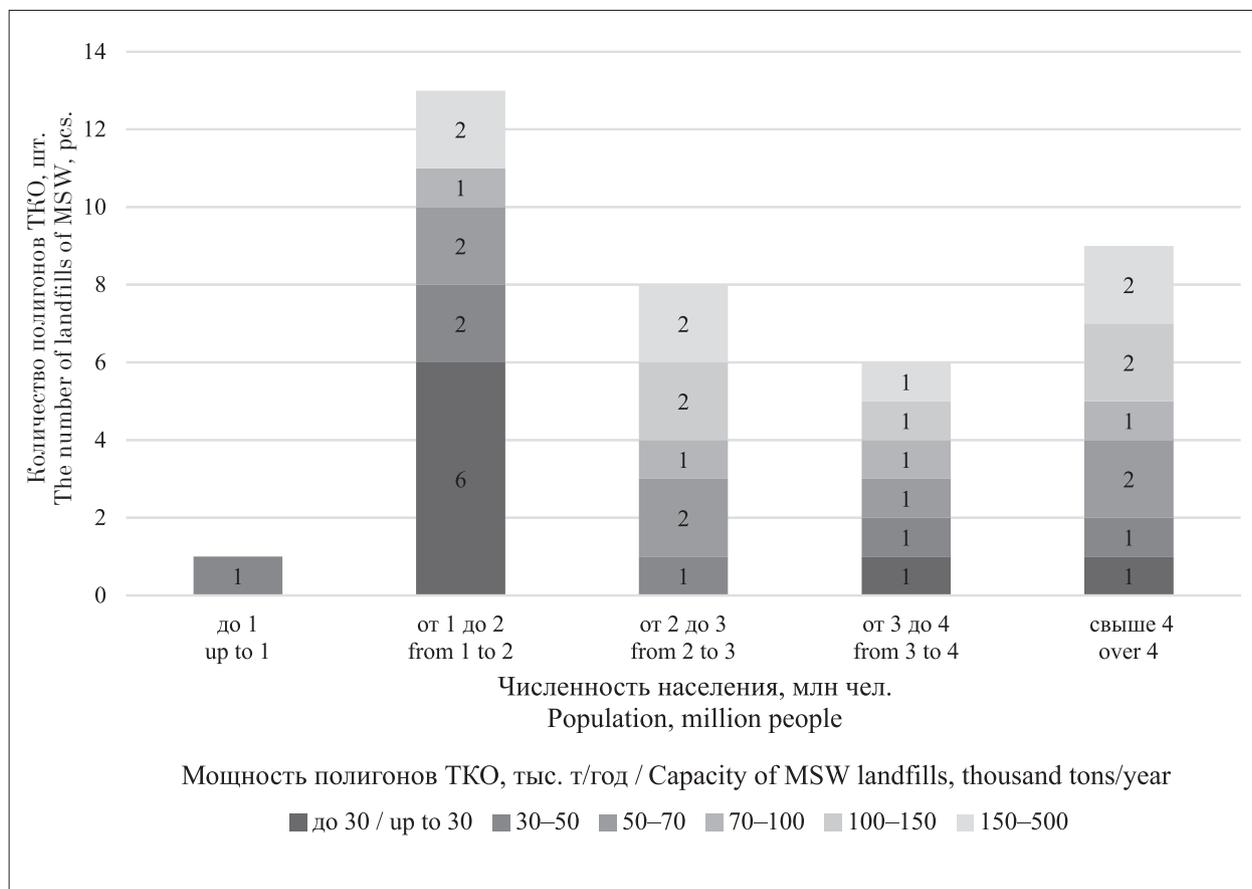


Рис. 3. Распределение полигонов ТКО по мощностям для различных типов отхообразующих пространств / **Fig. 3.** Distribution of MSW landfills by capacity for various types of waste-generating areas

цикла по обращению с отходами мощностью от 70 до 500 тыс. т/год.

Результаты анализа планируемых к реализации на территории ПФО полигонов ТКО позволили разделить их на группы различной годовой мощности (рис. 2).

Рисунок 2 демонстрирует значительный перевес в пользу проектирования на территории регионов ПФО полигонов ТКО с минимальной и средней мощностями. В данном случае приоритет отдан строительству полигонов ТКО мощностью до 30 тыс. т/год.

Анализ зависимости количества планируемых к реализации на территории ПФО полигонов ТКО различной годовой мощности от численности населения регионов, на территории которых планируется их строительство, приведён в виде гистограммы (рис. 3).

Данные гистограммы демонстрируют значительное количество перспективных полигонов с минимальной (до 30 тыс. т/год) и средней (30–50 тыс. т/год, 50–70 тыс. т/год) мощностями на территории регионов с численностью от 1 до 2 млн человек. Следует отметить, что из 14 регионов ПФО 6 регионов (43% от общего количества) с численностью

от 1 до 2 млн. Одновременно с этим, более 46% полигонов, планируемых к строительству на вышеуказанных территориях, проектируется с мощностями до 30 тыс. т/год.

Проведённый анализ позволил сделать вывод о повышенной потребности в проектировании и геоэкологической оценке объектов захоронения ТКО с минимальной мощностью. На основании этого для исследовательской работы в качестве эталонного образца принят полигон мощностью захоронения до 30 тыс. т.

Анализ действующих и перспективных объектов захоронения ТКО позволил разделить конструктивные решения по организации участка захоронения отходов на следующие типы (рис. 4):

1. Полигоны карьерного типа (с заглублением в рельеф);
2. Полигоны насыпного типа (плоские, высотные);
3. Полигоны комбинированного типа (карьерные полигоны с последующим образованием насыпи).

Сравнительная оценка геоэкологических, технико-экономических и эксплуатационных параметров строительства объекта захороне-

ния ТКО выполнена путём разработки трёх вариантов технических и технологических решений для эталонного полигона ТКО мощностью до 30 тыс. т/год с различными типами устройства участка захоронения ТКО (табл. 1). Для эталонного объекта рассмотрен участок складирования площадью в 3 га, соразмерный строящемуся в Самарской области объекту захоронения ТКО аналогичной мощности, для максимальной приближённости исследования к реальным объектам.

Общие эксплуатационные параметры эталонного объекта (табл. 1), рассчитанные для трёх вариантов реализации, различаются между собой в разы, что создаёт весомую разницу в ТЭПах объекта. Целесообразность достижения в технологических решениях максимальных мощностных параметров объектов на единицу используемой площади участка захоронения определяется сравнительным анализом капитальных и эксплуатационных затрат [5].

Оценка капитальных затрат для исследуемых трёх вариантов эталонного полигона выполнена на основе геоэкологических и технических параметров создания объекта. Геоэкологическими параметрами создания участка захоронения ТКО являются: площадь земель, изымаемая в хозяйственный оборот; глубина воздействия хозяйственной деятельности на геологическую среду; качество извлекаемых геологических элементов; способ обращения с излишками грунта.

Глубина воздействия хозяйственной деятельности на геологическую среду является как негативным экологическим фактором, в связи с тем, что осуществляется изъятие геологических ресурсов, так и основным положительным геоэкологическим параметром создаваемого объекта, так как заглупление участка захоронения увеличивает мощностные параметры и срок эксплуатации объекта (табл. 1). Это предупреждает раннее вовлечение дополнительных земельных участков под

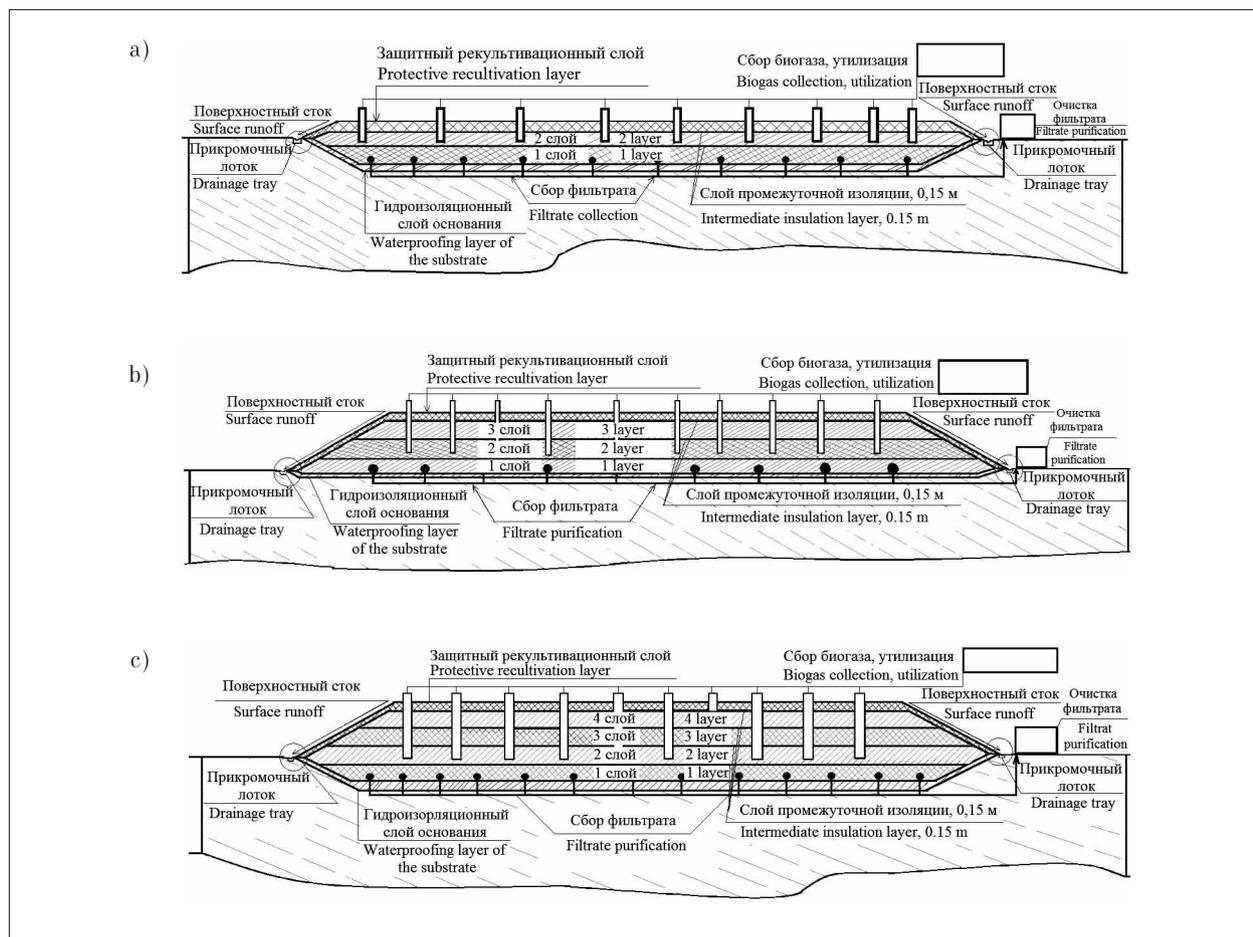


Рис. 4. Технологические решения конструкции участка захоронения полигона: (а) полигон карьерного типа, (б) полигон насыпного типа (плоский полигон), (с) полигон комбинированного типа (карьер с насыпью)

Fig. 4. Technological solutions for landfill site design: (a) quarry landfill, (b) bulk landfill (flat landfill), (c) combined type landfill (quarry with embankment)

аналогичный, «исчерпавший свою вместимость» полигон, строительство которого предполагается в непосредственной близости от закрываемого объекта, так как расположение последнего определяется логистической схемой наибольшей транспортной доступности [6, 7]. Таким образом, данный геоэкологический параметр определяет степень полезной эксплуатации единицы площади изымаемого земельного участка.

Помимо указанного, рассматриваемый геоэкологический параметр играет важную технологическую роль в создании ложа участка захоронения ТКО, способного аккумулировать в порах уплотнённых отходов объёмы образуемого в массиве свалочного тела фильтрата без угрозы излива последнего на прилегающий рельеф [8, 9].

Методиками, включёнными в действующие нормативно-правовые акты, при расчёте отводимого стока фильтрата не предусматривается исключение из объёма образования фильтрата полигона свободного объёма ложа. На практике эксплуатации полигонов заглублённого типа свободный объём ложа играет роль буферной ёмкости в период массового снеготаяния и залпового образования фильтрата. Наличие подобного буфера позволит сократить мощности проектируемых станций очистки фильтрата и объёмы прудов-накопителей, требующих как капитальных затрат, так и нарушения геологической среды [10, 11].

В исследуемых объектах параметр глубины воздействия хозяйственной деятельности на геологическую среду рассматривается от максимально возможного заглубления до отказа от заглубления участка захоронения ТКО.

Качество извлекаемых инженерно-геологических элементов напрямую влияет на способ обращения с излишками грунта, определение которого состоит из двух этапов. Первый этап – определение качества геологического элемента, т. е. анализ грунтов на загрязнённость по химическим, радиационным, паразитологическим, токсикологическим, санитарно-бактериологическим и паразитологическим показателям. Второй этап – юридическое категорирование извлекаемого геологического элемента: в качестве общераспространённого полезного ископаемого – грунта; в качестве грунтов, образуемых в результате строительных работ. Обращения с излишками грунтов при их соответствии химическим параметрам в качестве полезного ископаемого носит положительный экономический характер, но не применяется на практике из-за отсутствия правового системного подхода. Обращение с излишками грунтов, образуемых в результате строительства, в качестве отходов V и (или) IV классов опасности, наиболее практически применимый в настоящее время подход инвесторов. Данный подход экономически затратный и является отрицательным геоэкологическим параметром.

Таблица 1 / Table 1

Технические и технологические параметры эталонного полигона ТКО с различными категориями устройства участка захоронения ТКО / Technical and technological parameters of a reference MSW landfill with different categories of MSW disposal site design

Показатель Indicator	Тип участка захоронения ТКО Type of MSW disposal site		
	карьер quarry	плоские (насыпные полигоны) flat (bulk landfills)	карьер с насыпью quarry with embankment
Мощность, тыс. т/год Capacity, thousand tons/year	<30	<30	<30
Срок эксплуатации, лет Service life, years	3,77	9,70 (↑ 257,30%)	15,92 (↑ 422,30%)
Вместимость полигона, т Landfill capacity, t	113 100,00	291 000,00 (↑ 257,30%)	477 000,00 (↑ 422,30%)
Вместимость полигона по уплотнённым отходам, м ³ Landfill capacity for compacted waste, m ³	86 991,00	223 732,00 (↑ 257,30%)	367 426,00 (↑ 422,30%)
Площадь участка захоронения отходов, га Area of waste disposal site, ha	3,00	3,00	3,00

Примечание: ↑ – % по отношению к параметрам карьера.
Note: ↑ – % in relation to quarry parameters.

Таблица 2 / Table 2

Технико-экономические показатели (ТЭП) объектов исследования
 Technical and economic indicators (TEI) of the research objects

Показатель Indicator	Стоимостная оценка ТЭП / Cost assessment of TEI		
	карьерный участок захоронения ТКО quarry MSW disposal site	насыпной участок захоронения ТКО bulk MSW disposal site	комбинированный участок захоронения ТКО (карьер с насыпью) combined MSW disposal site (quarry with embankment)
Стоимость выполнения строительных работ, тыс. руб. без НДС Cost of construction work, thousand rubles excl. VAT	403 969,60	362 559,13 (↓ 10,25%)	403 969,60
Расходы, включаемые в тариф регионального оператора, тыс. руб./год Expenses included in the tariff of a regional operator, thousand rubles/year	107 164,83	37 396,30 (↓ 65,13%)	25 372,12 (↓ 76,30%)
Расходы, включаемые в тариф граждан субъектов РФ, руб./м ³ в год Expenses included in the tariff for citizens of constituent entities of the Russian Federation, rubles/m ³ per year	714,43	249,31 (↓ 65,13%)	169,15 (↓ 76,30%)
Условная стоимость размещения 1 т отходов без учёта эксплуатационных затрат, руб./т Conditional cost of disposal of 1 t of waste without taking into account operational costs, rubles/ton	3 571,79	1 245,91 (↓ 65,13%)	846,90 (↓ 76,30%)

Примечание: ↓ – % по отношению к параметрам карьерного участка захоронения ТКО.
 Note: ↓ – % in relation to the parameters of the quarry MSW disposal site.

тром создания полигона, но ввиду массового распространения в практике строительства принят в основу исследуемого объекта [12].

Техническими параметрами объекта является набор основных и вспомогательных сооружений, обслуживающих эксплуатацию участка захоронения отходов, в соответствии с его функциональным зонированием:

1. Производственная зона в составе:

– участок захоронения отходов IV и V классов опасности – «тело» полигона мощностью до 30 тыс. т/год;

– участок хранения минерального грунта из расчёта месячной потребности технологической изоляции рабочих карт;

2. Вспомогательная (хозяйственная) зона в составе:

– объекты подсобного и обслуживающего хозяйства (контрольно-пропускной пункт радиационного и весового контроля; весовая; дезинфицирующая ванна; помещение для одежды с сантехническим баком (2 шт); комната приёма пищи; резервуар для хранения

противопожарного запаса воды; мониторинговые скважины);

– объекты энергетического хозяйства (комплектная трансформаторная подстанция);

– наружные сети и сооружения водоснабжения, водоотведения (пруд-накопитель фильтрата; пруд-накопитель поверхностных сточных вод; канализационная насосная станция (КНС) фильтрата; КНС поверхностных сточных вод; станция очистки фильтрата; очистные сооружения поверхностных сточных вод; резервуар-накопитель очищенных сточных вод; резервуар-накопитель концентрата).

Сформированный набор основных ТЭПов и их стоимостные показатели для объектов исследования представлены в таблице 2. Стоимостные показатели рассчитаны по разработанным проектным решениям для трёх объектов исследования на основании данных из сборников единичных расценок в уровне цен I квартала 2023 г.

В общем объёме выделенных ТЭПов стоимостной показатель ТЭПа «Стоимость

выполнения работ» при углублении участка захоронения ТКО возрастает на 10%. Наряду с этим, стоимостная оценка ТЭПов эксплуатационного периода показывает, что наименьшая условная стоимость размещения 1 т отходов достигается для объекта с комбинированным (карьер с насыпью) участком захоронения ТКО. Такой ТЭП, как «Условная стоимость размещения 1 т отходов», является возвратной составляющей объекта инвестирования, определяющей требуемый для окупаемости уровень тарифа объекта захоронения ТКО.

Результаты комплексного анализа геоэкологических и технико-экономических параметров объектов исследования позволили доказать целесообразность применения комбинированных (карьер с насыпью) решений обустройства участков захоронения ТКО, которые должны ложиться в основу технологических решений перспективных объектов захоронения ТКО.

Заключение

В ходе исследования разработана интегральная система оценки геоэкологических и являющихся стоимостным выражением оценки их применимости, технико-экономических показателей ресурсно-технологической обеспеченности проектных решений объектов по обращению с отходами.

Выделены и обоснованы наиболее значимые геоэкологические параметры проектирования и строительства полигонов ТКО, такие как изымаемая площадь земель; глубина воздействия на геологическую среду; качество извлекаемых грунтов и способ обращения с ними. В качестве технико-экономических показателей рассмотрены: срок эксплуатации; мощность; вместимость полигона по уплотнённым отходам; вместимость полигона по уплотнённым отходам; условная стоимость размещения 1 т отходов без учёта эксплуатационных затрат; расходы, включаемые в тариф граждан субъектов РФ; расходы, включаемые в тариф регионального оператора (и граждан субъектов РФ).

Сравнительная оценка предельных значений указанных параметров для трёх вариантов организации участка захоронения отходов (карьерный, насыпной, комбинированный) эталонного полигона ТКО позволила сделать выводы о целесообразности каждого варианта строительства карт захоронения. Однако при прочих равных условиях к приоритетному следует отнести комбинированный участок

захоронения ТКО. В результате разработанные критерии применимы для оценки избыточности и обоснования проектных технологических решений при строительстве объектов захоронения ТКО.

Литература

1. Национальный проект «Экология» [Электронный ресурс] https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/natsionalnyy-proekt-ekologiya/ (Дата обращения: 22.05.2024).
2. Отчёт о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Анализ выполнения мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность Российской Федерации, в части ликвидации объектов накопленного вреда и формирования комплексной системы обращения с твёрдыми коммунальными отходами» [Электронный ресурс] <https://ach.gov.ru/upload/iblock/41b/41b02dc50697e6fc57ec2f389a8b68f0.pdf> (Дата обращения: 30.06.2023).
3. Тупицына О.В., Самарина О.А., Губарь Е.В., Мосикян А.В., Кривошеева М.М. Эколого-экономическое регулирование обращения с ТКО в Самарской области // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: сб. докл. Всероссийской науч. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С. 335–339.
4. Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления. Отчёт по форме 2-ТП (отходы) [Электронный ресурс] <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (Дата обращения: 22.05.2024).
5. Губарь Е.В., Тупицына О.В. Разработка финансово-экономических моделей объектов обращения с ТКО на территории Приволжского федерального округа // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых учёных. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского горного университета, 2023. С. 393–395.
6. Середа Т.Г., Файзрахманов Р.А., Костарев С.Н. Научно-технологические решения в проектировании искусственных экосистем хранения отходов. Пермь: Перм. филиал Института экономики УрО РАН; ПГТУ, 2006. 290 с.
7. Елсаков В.В., Лаптева Е.М., Василевич М.И., Габова Е.В., Каверин Д.А., Кочанов С.К., Панюкова Е.В., Митюшева Т.П., Пыстина Т.Н., Семёнова Н.А., Тихонова Т.В. Обоснование потенциальных рисков размещения полигона твёрдых коммунальных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 72–79. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-072-079
8. Кантор Г.Я., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Моделирование углеродного баланса полигонов твёрдых коммунальных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 198–204. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204

9. Середа Т.Г., Костарев С.Н., Кочинов Ю.А., Кочина Т.В. Моделирование ресурсосберегающего обращения с твёрдыми коммунальными отходами // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2023. № 1 (24). С. 95–104. doi: 10.36622/VSTU.2023.24.1.011

10. Левин Е.В., Сагитов Р.Ф., Гамм Т.А., Шабанова С.В., Баширов В.Д. Экологическое обоснование места размещения полигона твёрдых бытовых отходов // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2016. № 3 (59). С. 182–184.

11. Воронкова Т.Б., Чудинов С.Ю. Теоретические аспекты водного баланса полигонов захоронения твёрдых бытовых отходов с системой рециркуляции фильтрата // *Теоретическая и прикладная экология*. 2013. № 1. С. 13–16. doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-013-016

12. Быков Д.Е., Тупицына О.В., Чертес К.Л. Рекультивация массивов органо-минеральных отходов. Самара: Изд-во Самарск. гос. тех. ун-та, 2007. 118 с.

References

1. National Project “Ecology” [Internet resource] https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/natsionalnyy-proekt-ekologiya/ (Accessed: 22.05.2024).

2. Report on the results of the expert-analytical event “Analysis of the implementation of measures ensuring the environmental safety of the Russian Federation in terms of the elimination of accumulated damage and the formation of an integrated solid municipal waste management system” [Internet resource] <https://ach.gov.ru/upload/iblock/41b/41b02dc50697e6fc57ec2f389a8b68f0.pdf> (Accessed: 30.06.2023).

3. Tupicina O.V., Samarina O.A., Gubar E.V., Mosikyan A.V., Krivosheeva M.M. Ecological and economic regulation of the treatment of solid waste management in the Samara region // *Safety, protection and conservation of the natural environment: fundamental and applied research: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. Belgorod: BGTU, 2020. P. 335–339 (in Russian).

4. Information on generation, treatment, utilization, decontamination, disposal of production and consumption waste. Report on Form 2-TP (waste) [Internet resource]

<https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (Accessed: 22.05.2024).

5. Gubar E.V., Tupicina O.V. Development of financial and economic models of facilities for providing assistance with MSW in the territory of the Volga Federal District // *Topical issues of rational use of natural resources: proceedings of the XIX International forum-contest of students and young scientists*. Sankt-Peterburg: Saint Petersburg Mining University, 2023. P. 393–395 (in Russian).

6. Sereda T.G., Fayzrakhmanov R.A., Kostarev S.N. High-tech technologies in the design of artificial waste storage ecosystems. Perm: Permskiy filial Instituta ekonomiki UrO RAN; PGTU, 2006. 290 p. (in Russian).

7. Elsakov V.V., Lapteva E.M., Vasilevich M.I., Gabova E.V., Kaverin D.A., Kochanov S.K., Panyukova E.V., Mityusheva T.P., Pystina T.N., Semenova N.A., Tikhonova T.V. The assessment of potential risks of solid municipal waste landfill // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 72–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-072-079

8. Kantor G.Ya., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. Modeling carbon balance of municipal solid waste landfills // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 198–204 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204

9. Sereda T.G., Kostarev S.N., Kochinova Yu.A., Kochinova T.V. Modeling of resource-saving handling of solid municipal waste // *Housing and utilities infrastructure*. 2023. No. 1 (24). P. 95–104 (in Russian). doi: 10.36622/VSTU.2023.24.1.011

10. Levin E.V., Sagitov R.F., Gamm T.A., Shabanova S.V., Bashirov V.D. Ecological justification of the location of a solid waste landfill // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2016. No. 3 (59). P. 182–184 (in Russian).

11. Voronkova T.B., Chudinov S.Yu. Theoretical aspects of landfill leachate recirculation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 13–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-013-016

12. Bykov D.E., Tupicina O.V., Chertes K.L. Reclamation of organo-mineral waste arrays. Samara: Samara State Technical University, 2007. 118 p. (in Russian).

Влияние экстрактивных компонентов древесной зелени ели на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной

© 2025. С. К. Стеценко¹, к. б. н., с. н. с., Е. М. Андреева¹, к. б. н., с. н. с., Т. В. Хуршкайнен², к. х. н., в. н. с., М. В. Ермакова¹, д. с-х. н., в. н. с., А. В. Кучин², д. х. н., академик РАН, г. н. с., Г. Г. Терехов¹, д. с-х. н., в. н. с.,

¹Ботанический сад УрО РАН, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202а, ²Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48, e-mail: stets_s@mail.ru

Представлены результаты двухлетнего эксперимента по выращиванию в условиях лесного питомника сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из семян, прошедших предпосевную обработку экстрактивными веществами, выделенными из древесной зелени ели эмульсионным способом. В составе кислых компонентов преобладают фенольные кислоты, нейтральные компоненты древесной зелени ели содержат эфирные масла, полипренолы, каротиноиды и другие биологически активные вещества. В эксперименте оценивали биометрические параметры и развитие сеянцев сосны: у однолетних растений определяли интенсивность микорризации корней, у двухлетних сеянцев исследовали элементный состав хвои и плотность древесины стволиков. При анализе хвои сосны выявлено более высокое содержание калия в паре К-Са при применении кислых компонентов биопрепарата, что указывает на более активные фотосинтетические процессы и транспорт ассимилянтов к органам растения, обеспечивающие активный рост сеянцев в этом варианте. Кислые компоненты в дозе 0,5 г/кг семян стимулируют рост сеянцев сосны при отставании процесса уплотнения клеток и одревеснения прироста. Нейтральные компоненты ели оказывают положительное влияние на формирование основных морфометрических характеристик и физических свойств древесины сосны, в дозе 0,012 г/кг семян способствуют повышению сохранности сеянцев в неблагоприятных погодных условиях. Сделан вывод о необходимости более углублённого изучения действия нейтральных компонентов древесной зелени ели на сеянцы сосны, поскольку они способствовали как активизации ростовых процессов, так и формированию оптимальных физических параметров растений.

Ключевые слова: древесная зелень ели, экстрактивные вещества, сеянцы сосны, элементный состав хвои, плотность древесины.

The effect of extractive compounds of spruce greenery on the growth and structural features of *Pinus sylvestris* seedlings

© 2025. S. K. Stetsenko¹ ORCID: 0000-0002-4885-3817, E. M. Andreeva¹ ORCID: 0000-0003-2651-2541, T. V. Hurshkainen² ORCID: 0000-0003-2710-243X, M. V. Ermakova¹ ORCID: 0000-0002-9894-6587, A. V. Kuchin² ORCID: 0000-0003-4322-7961, G. G. Terekhov¹ ORCID: 0000-0002-2312-9224

¹Botanical Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia, 620144,

²Institute of Chemistry Komi Science Center Ural Division of RAS, 48, Pervomaiskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000, e-mail: stets_s@mail.ru

The results of a two-year experiment on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings growing in a forest nursery are presented. Pine seeds were pre-treated with extractives (neutral and acidic components) isolated by emulsion method from spruce green left after timber harvesting. Phenolic acids dominated in acidic components. Essential oils, polyprrenols, carotenoids and other biologically active substances are among the neutral components of spruce greenery. We assessed biometric parameters and structural features of seedlings. The intensity of mycorrhization of roots was determined in 1-year-old seedlings, and the elemental composition of needles and the wood density of stems were studied in 2-year-old seedlings. The analysis of pine needles revealed a higher potassium content in the K-Ca pair when acidic components of the biopreparation were applied. This indicates more active photosynthetic processes and transport of assimilates to the plant organs, providing active growth of seedlings in this variant. Acidic components at a dose of 0.5 g/kg of seeds stimu-

late the growth of seedlings when the process of cell hardening and lignification of increment lags. Neutral components have a positive effect on the formation of the main morphometric characteristics and physical properties of wood. At a dose of 0.012 g/kg of seeds, they increase seedlings preservation in adverse weather conditions. Based on the totality of the studied characteristics, a more in-depth study of neutral components effect is necessary, since neutral components of spruce greenery had a positive effect on seedlings preservation and contributed to both the activation of growth processes and the formation of optimal physical parameters of plants.

Keywords: spruce greenery, extractives, pine seedlings, elemental composition of needles, wood density.

Лесные питомники Свердловской области в настоящее время представлены относительно небольшими участками территорий с длительным сроком эксплуатации, где происходит возделывание монокультуры – сосны или ели. Севообороты при недостатке агротехнических ресурсов не приводят к необходимому уровню плодородия, способствующему получению качественной лесорастительной продукции. Негативным фактором, сопровождающим выращивание семян, является накопленное с годами пестицидное загрязнение пахотного слоя почвы [1]. Погодные условия последних лет – несколько засушливых периодов подряд – крайне ухудшают условия роста культивируемых растений. В то же время, семена, получаемые из лесного питомника, должны обладать требуемыми размерами надземной части и достаточно развитой корневой системой, способной снабдить растение необходимым количеством влаги и минеральных веществ во время сложного периода их пересадки в лесную среду. Сложившаяся ситуация делает актуальными разработку, испытание и включение новых технологических приёмов, обеспечивающих экономическую обоснованность получения растительной продукции.

Одним из способов решения проблемы становится разработка новых биопрепаратов, улучшающих условия роста семян, формирование защитных механизмов от фитопатологических агентов и активизацию метаболических реакций [2–7]. Развитие этого научно-практического направления объясняется многими факторами: необходимостью переработки отходов лесозаготовок; получения биостимуляторов из растительного сырья экономически оправдано, т. к. их стоимость ниже синтетических аналогов; продукты из растительного сырья легко разлагаются или перерабатываются растительными организмами и не загрязняют окружающую среду [8].

В Институте химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия) разрабатываются и успешно внедряются регуляторы роста растений, получаемые экологически безопасным способом эмульсионной экстракции из древесной зелени хвойных пород (пихты, ели,

сосны), которые подтвердили свою эффективность при выращивании как сельскохозяйственных растений, так и хвойных семян [9]. Эти препараты содержат различные классы природных соединений. Росторегулирующими свойствами могут обладать не все вещества-компоненты, входящие в состав исходного экстракта [10]. Поэтому для понимания механизма и специфики воздействия регулятора роста на выращиваемую культуру необходимо выявление в нём соединений, проявляющих биологическую эффективность.

Эмульсионный экстракт древесной зелени ели, на основе которого был разработан препарат Вэрва-ель, включает в себя ряд биологически активных веществ, составляющих фракции нейтральных и кислых соединений [11].

Цель работы – изучить степень проявления стимулирующего эффекта компонентов эмульсионного экстракта древесной зелени ели на рост и качество семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Объекты и методы исследований

Для проведения исследований были подготовлены образцы кислых (КК) и нейтральных (НК) экстрактивных компонентов, выделенных из эмульсионного экстракта древесной зелени ели [11]. В составе КК ели преобладают фенольные кислоты (*para*-кумаровая, ванилиновая, кофейная, феруловая). Основной компонент *para*-гидроксиацетофенон известен бактерицидной и фунгицидной активностью [12]. Нейтральные компоненты ели содержат эфирные масла, полипренолы, каротиноиды и другие биологически активные вещества [11].

Влияние компонентов эмульсионного экстракта древесной зелени ели на семена сосны изучали в Балтымском лесном питомнике (Свердловская область). Почва экспериментального участка по механическому составу суглинков лёгкий крупно-пылеватый. Содержание гумуса в почве питомника 4,5–5,3%, $pH_{\text{вод}}$ – 4,5–4,6, содержание подвижных форм фосфора и калия (мг/100 г почвы) 2,4–6,9 и

9,4–12,4 соответственно. Общий азот – 0,5–3,2 мг/100 г почвы. Почва питомника – средне и слабо окультуренная для возделывания лесных пород [13].

Семена перед посевом замачивали в течение 6 ч в растворах НК в дозах 0,012 и 0,12 г/кг; в растворах КК – в дозах 0,05 и 0,5 г/кг; в контроле – в дистиллированной воде. 6-строчный посев семян выполняли в опытные площадки размером 1,5×1,0 м. Норма высева семян – 1,5 г/пог. м. Агротехнические уходы за посевами проводили своевременно в полном объёме (рыхление почвы, удаление сорной растительности, полив при необходимости).

Сеянцы выращивали два года. Ежегодно в сентябре отбирали совокупность растений для изучения основных биометрических параметров (высота и диаметр стволика, длина корня). У однолетних сеянцев учитывали плотность сосущих и проводящих корней, а также эктомикоризных окончаний. Определяли плотность корешков на единицу длины корня и интенсивность микоризации, как соотношение количества микоризованных корней к общему количеству поглощающих корней [14].

Для проведения элементного анализа отбирали образцы хвои опытных и контрольных растений. Для сравнения выполняли анализ хвои двухлетних сеянцев из посева, который выполнялся работниками лесничества – производственный посев (ПП). Цель включения ПП в группу сравнения – изучение состояния сеянцев, выращиваемых без применения стимуляторов и регулярного агротехнического ухода. Биометрические показатели сеянцев ПП: высота стволика 7,6 см, толщина стволика 1,7 мм, длина главного корня 20,6 см. По значению высоты эти сеянцы являются нестандартными, и их необходимо оставлять ещё на год до достижения ими требуемых размеров.

Для элементного анализа образцы хвои двухлетних сеянцев сосны сушили в сушильном шкафу, затем озоляли в муфельной печи при 550 °С с шагом 3 °/мин в течение 6 ч. Анализ микро- и макроэлементов выполняли на рентгенофлуоресцентном анализаторе MESA 500W фирмы Horiba (Япония).

Базисную плотность древесины стволиков двухлетних сеянцев определяли по методу максимальной влажности [15]. Стволики разделяли на две части, соответствующие приросту первого (2021) и второго (2022) года. Каждую часть анализировали отдельно. Массу определяли с точностью до 0,0001 г.

Для изученных показателей рассчитали среднее значение и ошибку среднего; достовер-

ность различий средних значений установили с помощью t-критерия Стьюдента ($t_{\text{факт}}$ должен быть больше или равно $t_{\text{теор}}$ для данного числа наблюдений, чтобы гипотеза была верна). При расчётах использовали пакет программ Statistica 8.0.

Результаты и обсуждение

Особенности вегетационного периода оказывают значительное влияние на ответную реакцию сеянцев при применении биостимуляторов. В период активного роста сеянцев в высоту, который происходит со второй половины мая до конца июня [16], действие биостимулятора будет максимально эффективным только при достаточном снабжении растения влагой [17]. Мониторинг погодных условий за первые два месяца вегетационного периода показал, что в первый год появление всходов, начало роста корней и надземной части сеянцев происходило в засушливый период: за май и июнь выпало 64 мм осадков при средних многолетних показателях 119 мм; во второй год было прохладно (на 1,2 °С ниже нормы) и количество осадков превышало средние многолетние значения на 34% [18, 19].

У растений, выросших с применением низких концентраций НК и КК, сохранность сеянцев в конце первого вегетационного сезона была выше этого показателя в контрольном варианте на 61 и 87% соответственно (табл. 1). Во второй год роста сохранность сеянцев резко снизилась в контроле и в варианте с применением КК в дозе 0,05 г/кг. Обработка КК в дозе 0,5 г/кг снизила выход сеянцев менее значительно, но это, вероятно, связано с тем, что в первый год роста произошёл сильный отпад растений в этом опыте. Таким образом, обработка НК положительно влияет на сохранность сеянцев сосны.

Биометрические показатели сеянцев, установленные в конце вегетационных сезонов, приведены в таблице 2.

У однолетних растений сосны выраженное стимулирующее влияние экстрактов, несмотря на засушливые условия роста, отмечено в варианте с НК в дозе 0,12 г/кг: высота сеянцев и длина главного корня намного превышали те же показатели в контрольной группе ($t_{\text{факт}}$ был 7,80 и 4,04 при $t_{\text{теор}}=2,00$ соответственно). Диаметр стволика в этом же варианте также был значительно больше ($t_{\text{факт}}=3,53$ при $t_{\text{теор}}=2,00$). Высота растений в других опытных вариантах оказалась меньше или немного больше высо-

Таблица 1 / Table 1

Сохранность сеянцев сосны, обработанных экстрактивными компонентами эмульсионного экстракта ели, шт./пог. метр / Preservation of pine seedlings treated with extractive components of emulsion spruce extract, pcs/linear meter

Вариант Variant	Доза, г/кг семян Dose, g/kg of seeds	Сохранность сеянцев сосны, шт./пог. м / Pine seedlings preservation, pcs/linear meter		Снижение сохранности относительно первого года, % Decrease in preservation compared to the first year, %
		первый год first year	второй год second year	
Контроль Control	0,0	119,2	39,4	67,0
Нейтральные компоненты Neutral components	0,012	192,6	109,5	43,1
	0,12	107,5	83,4	22,4
Кислые компоненты Acidic components	0,05	223,5	56,5	74,7
	0,5	88,2	87,7	0,6

Таблица 2 / Table 2

Биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной в лесном питомнике, выращенных с применением экстрактивных компонентов эмульсионного экстракта ели / *Pinus sylvestris* seedlings biometric parameters in a forest nursery grown with extractive components of spruce emulsion extract

Показатель Parameter	Контроль Control	Нейтральные компоненты, г/кг семян Neutral components, g/kg of seeds		Кислые компоненты, г/кг семян Acidic components, g/kg of seeds	
		0,012	0,12	0,05	0,5
1-летние сеянцы / 1-year-old seedlings					
Высота, см / Height, cm	3,40±0,15	2,90±0,12*	4,90±0,12*	2,90±0,13*	4,00±0,21*
Диаметр стволика, мм Stem, mm	0,90±0,04	0,90±0,03	1,10±0,04*	1,00±0,03	1,10±0,05*
Длина главного корня, см Root length, cm	17,4±0,9	18,8±0,6	21,7±0,6*	23,9±0,6*	18,7±0,9
2-летние сеянцы / 2-year-old seedlings					
Высота, см / Height, cm	11,1±0,6	10,1±0,4	14,8±0,8*	11,0±0,5	18,7±0,6*
Диаметр стволика, мм Stem, mm	2,50±0,12	2,00±0,06*	2,30±0,12	2,10±0,10*	2,70±0,15
Длина главного корня, см Root length, cm	18,7±0,4	21,9±0,5*	20,3±0,7*	21,5±0,5*	20,7±0,7*

Примечание: * – достоверные различия ($p < 0,05$) между контрольным и опытными вариантами.
Note: * – significant differences ($p < 0,05$) between the control and experimental variants.

ты контрольных сеянцев, однако различия были недостоверными. Главный корень был длиннее контрольного во всех вариантах обработки, статистически значимые различия с контрольными растениями были отмечены в вариантах НК 0,12 г/кг и КК 0,05 г/кг семян – $t_{\text{факт}} = 4,04$ и $6,13$ соответственно при $t_{\text{теор}} = 2,00$.

Развитие корневой системы однолетних сеянцев сосны оценивали по показателю плотности корней второго порядка и по степени микоризации сосущих корешков (рис. 1). Общее

количество боковых корней было одинаковым в контроле и при применении высоких доз НК и КК. Соотношение сосущих и поглощающих корней при использовании КК в дозе 0,5 г/кг аналогично контролю. Заселение корневых окончаний микоризными грибами у опытных сеянцев шло более медленными темпами, чем у контрольных растений. Подобный эффект – более низкая скорость микоризообразования у растений, растущих с применением биостимуляторов, ранее отмечалась у однолетних сеянцев сосны [20]. Слабое развитие боковых корней

показали сеянцы в варианте НК 0,012 г/кг, что сопровождалось более высокой степенью микоризации корневых окончаний относительно других опытных вариантов.

Достаточное количество осадков в начале второго вегетационного сезона стало благоприятным условием для роста сеянцев в высоту: прирост в контрольном варианте и при применении НК в дозе 0,012 г/кг составил в среднем 7,5 см. В опытах с высокими дозами компонентов обоих видов отмечена существенная прибавка размеров стволика – от 9,9 до 14,7 см. Отличие значения высоты стволика в вариантах с компонентами от его размеров в контроле было достоверным – $t_{факт}$ изменялся от 3,67 до 8,66 при $t_{теор} = 2,00$. В варианте КК в дозе 0,05 г/кг семян высота стволика сеянцев не отличалась от контроля, однако прирост за второй год был больше.

В варианте НК в дозе 0,012 г/кг сеянцы сосны характеризовались наименьшей толщиной стволика, однако в этой совокупности растений отмечена наибольшая длина главного корня (при сравнении с контролем $t_{факт} = 4,84$ при $t_{теор} = 2,00$). В остальных вариантах размеры корня были больше, но отличие было не существенным, толщина стволика достоверно не отличалась от контрольного значения.

Для выявления действия стимуляторов на уровне биохимических реакций растений

был выполнен элементный анализ хвои двухлетних сеянцев сосны. Минеральные вещества обеспечивают течение многих метаболических реакций в растениях, а также входят в состав их органов как самостоятельные элементы и в составе органических соединений, способствуя накоплению массы растительной продукции.

Анализ показал, что в образцах всех вариантов преобладают Ca, K, P, Mg и Si (рис. 2). Содержание остальных элементов не превышает 5%-ного уровня. В опытных и контрольном вариантах отмечено относительно высокое содержание K в сравнении с другими элементами. Максимальное накопление K установлено в золе сеянцев с обработкой КК.

Характер накопления Ca обратно пропорционален содержанию K – менее всего этот элемент накапливался в хвое при влиянии КК. Содержание Ca в хвое растений ПП значительно выше, чем в опытных образцах. Количество K в этой группе растений меньше, чем кальция. Калий выполняет важную роль в метаболических реакциях в хлоропластах, регулирует содержание органических кислот [21]. Кальций частично выполняет функции, противоположные K, и ингибирует его реакции. Кальций входит в состав пектиновых веществ, составляющих стенки отдельных клеток. Отмечено, что к концу вегетационного

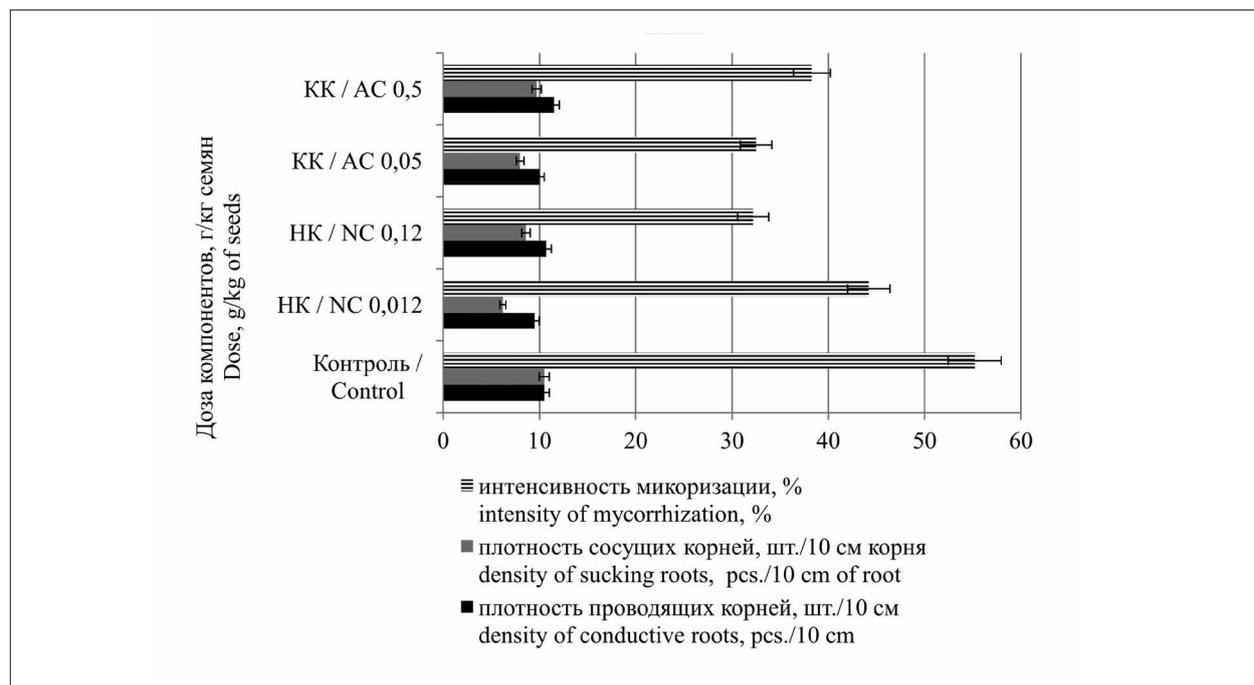


Рис. 1. Структурные особенности корневой системы и её микоризация у однолетних сеянцев сосны. НК – нейтральные компоненты, КК – кислые компоненты
Fig. 1. Structural features of the root system and its mycorrhization in 1-year-old pine seedlings. NC – neutral components, AC – acidic components

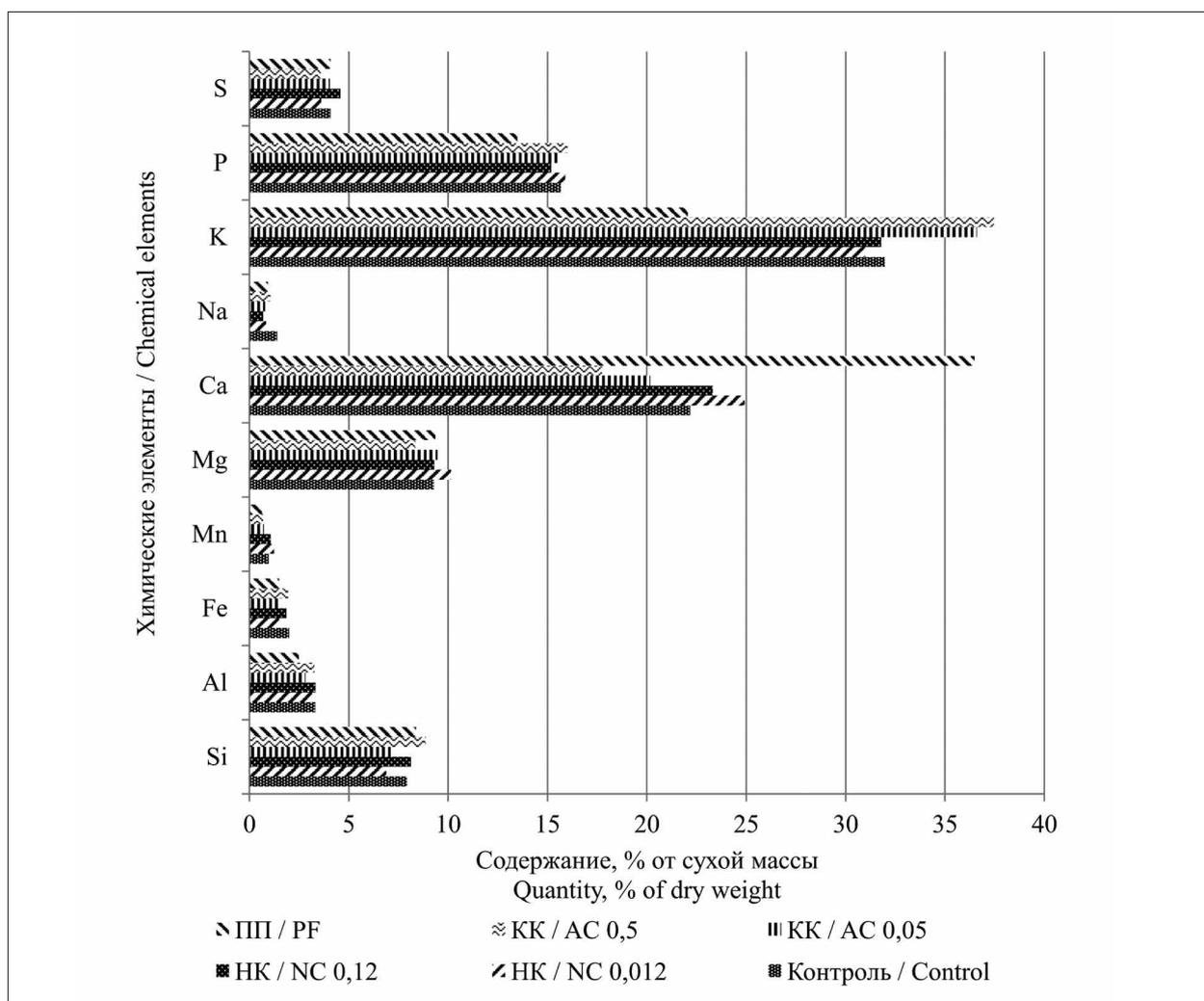


Рис. 2. Содержание элементов в хвое у двухлетних сеянцев сосны обыкновенной. НК – нейтральные компоненты, КК – кислые компоненты, ПП – производственный посев
Fig. 2. Element content in the needles of 2-year-old pine seedlings. NC – neutral components, AC – acidic components, PF – seedlings from a production field

периода происходит аккумуляция Са в растениях [22].

Известно, что в растущей хвое преобладает К, а в стареющей – Са [23]. Известно, что калий через стимулирование работы хлоропластов участвует в поддержании фотосинтетических процессов и играет важную роль в транспорте ассимилянтов к органам растения [21], тем самым обеспечивая активный рост сеянцев в опытных вариантах. В большей степени этот процесс выражен у сеянцев под воздействием КК в обеих дозах. Соотношение К-Са в хвое сосны из ПП, а также пониженное содержание в ней Р, который расходуется в процессе синтеза нуклеиновых кислот и белков, говорит о том, что активность ростовых процессов в этой группе растений уже снижена.

Биохимический статус сеянцев может оказывать влияние на плотность древесины –

одну из основных качественных характеристик получаемых в питомниках сеянцев сосны и саженцев в последующих лесных культурах. Обычно это свойство анализируется в саженцах, но при определении этого показателя в двухлетних растениях можно судить о скорости и направлении морфоструктурного развития сеянцев под влиянием различных факторов роста.

Различия в плотности древесины между сеянцами из контрольного варианта и сеянцами из ПП отсутствуют (табл. 3). Наибольшая плотность участков стволика, относящихся к первому и второму году, была отмечена в вариантах с применением НК в двух дозах и КК в низкой дозе.

Плотность стволика в варианте КК 0,5 г/кг в приросте первого года была достоверно наименьшей в сравнении с остальными вариантами.

Таблица 3 / Table 3

Плотность древесины двухлетних сеянцев сосны обыкновенной (кг/м³), выращенных с применением экстрактивных компонентов эмульсионного экстракта ели / Wood density of 2-year-old pine seedlings (kg/m³) grown with extractive components of spruce emulsion extra

Вариант (доза, г/кг семян) Variant (dose, g/kg of seeds)	Плотность прироста стволика за 1-й год Wood density of stem increment at 1st year	Плотность прироста стволика за 2-й год Wood density of stem increment at 2nd year
Контроль / Control	417,0±3,0	333,0±3,7
НК 0,012 / NC 0.012	452,0±3,0*	342,0±0,9*
НК 0,12 / NC 0.12	443,0±2,2*	344,0±1,0*
КК 0,05 / AC 0.05	441,0±2,0*	344,0±0,9*
КК 0,5 / AC 0.5	403,0±2,1*	336,0±0,7
ПП / Seedlings from a production field	415,0±2,0	336,0±0,8

Примечание: * – различия между контрольным и опытными вариантами достоверны (p<0,05). НК – нейтральные компоненты, КК – кислые компоненты, ПП – производственный посев

Note: * – differences between control and experimental variants are reliable (p<0.05). NC – neutral components, AC – acidic components, PF – seedlings from a production field.

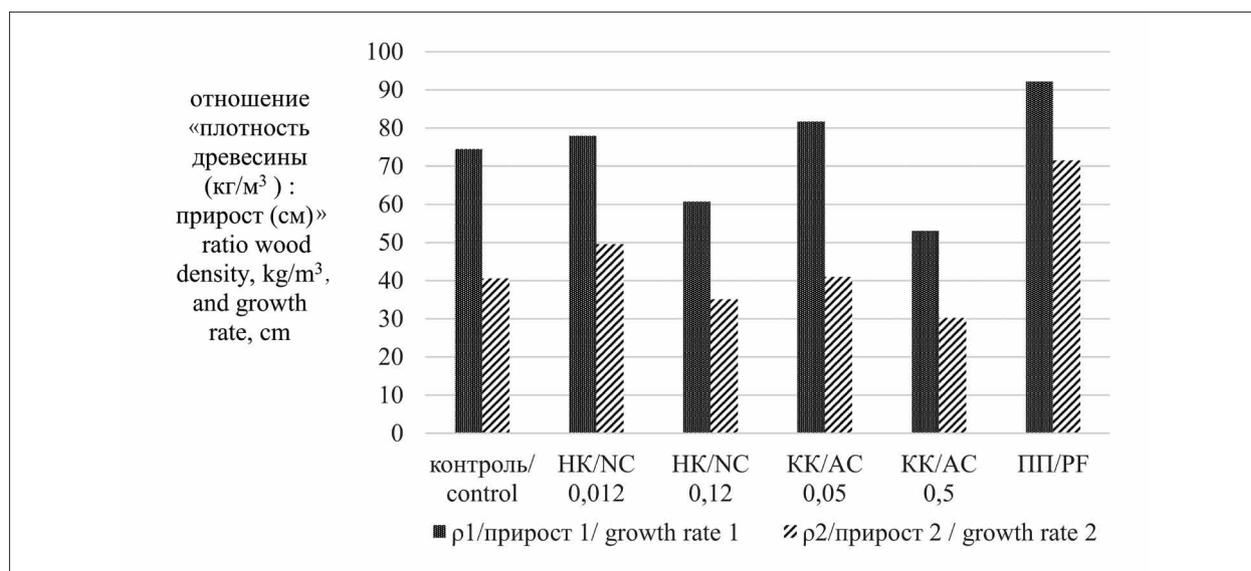


Рис. 3. Отношение плотности древесины (кг/м³) и величины прироста (см) сеянцев сосны: ρ1 – плотность древесины побега первого года (прирост 1); ρ2 – плотность древесины побега второго года (прирост 2). НК – нейтральные компоненты, КК – кислые компоненты, ПП – производственный посев
Fig. 3. Ratio of wood density (kg/m³) and growth rate (cm) of pine seedlings: ρ1 – wood density of the first year shoot (increment 1); ρ2 – wood density of the second year shoot (increment 2).
NC – neutral components, AC – acidic components, PF – seedlings from a production field

ми. Однако, в приросте второго года плотность стволика не отличалась от контроля (табл. 3).

Сопоставляя высоту однолетних сеянцев (табл. 2) с данными по плотности древесины (табл. 3) в вариантах НК 0,12 г/кг и КК 0,5 г/кг можно отметить, что при применении нейтральных компонентов сеянцы сосны развивались более гармонично – ускоренный рост в высоту сопровождался выраженным уплотнением стволика. В варианте с кислыми компонентами при интенсивном росте стволика в высоту плотность стволика формировалась более замедленными темпами. На второй год

при применении НК тоже отмечено уплотнение стволика.

Изучение соотношения плотности приростов стволика по годам с их длиной показало, что тенденция изменения этого показателя одинакова – он уменьшается на второй год роста во всех вариантах эксперимента (рис. 3). По величине этот показатель выше в ПП.

В опытных вариантах с применением небольших доз компонентов (НК 0,012 и КК 0,05) плотность на единицу длины стволика не имела выраженных различий с этим показателем в контроле. В опытных вариантах с

использованием высоких доз, по сравнению с контролем, этот показатель уменьшается, особенно в варианте с КК, что, вероятнее всего, указывает на более активный рост в высоту и некоторое отставание процесса уплотнения клеток и одревеснения прироста. Последнее согласуется с выводами по динамике элементного состава хвои – интенсивность метаболических процессов, определяющих рост растения, более выражена в варианте с применением КК в дозе 0,5 г/кг семян.

Заключение

Включение экологически безопасных биопрепаратов в агротехнику выращивания сосны обыкновенной в лесном питомнике способствует улучшению качества и объёмов получаемой растительной продукции. Предпосевная обработка НК в дозе 0,012 г/кг семян положительно влияет на сохранность однолетних сеянцев сосны в условиях неблагоприятного начала вегетационного сезона. Нейтральные компоненты в дозе 0,012 г/кг и КК в дозе 0,5 г/кг семян эффективнее стимулируют рост однолетних сеянцев сосны. Экстракты древесной зелени ели положительно повлияли на длину главного корня у опытных сеянцев сосны, а интенсивность микоризации корневых окончаний была ниже по сравнению с контролем.

Во второй год роста опытные сеянцы сосны показали интенсивный прирост стволика по высоте: в варианте НК 0,12 г/кг семян размеры стволика были больше контроля на 33%, а в варианте КК 0,5 г/кг семян – на 68%.

Элементный анализ хвои двухлетних сеянцев сосны показал, что характер распределения пары К-Са в опытных вариантах с применением КК указывает на более активно протекающие метаболические процессы, связанные с ростом сеянцев. При этом активный рост в высоту сопровождается некоторым отставанием процесса уплотнения клеток и одревеснения прироста.

Таким образом, влияние компонентов древесной зелени ели на растения сосны обыкновенной подтверждается на уровне биохимических процессов, приводящих к изменениям в формировании морфометрических показателей и физических свойств древесины сеянцев сосны. По совокупности изученных характеристик необходимо более глубокое изучение влияния НК, которые положительно повлияли на сохранность сеянцев и способствовали как активизации ростовых процессов, так и формированию оптимальных физических параметров растений сосны.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 21-73-20091, изучение физических свойств древесины сеянцев проведено в рамках государственного задания ФГБУН Ботанический сад УрО РАН». Авторы выражают благодарность старшему инженеру-технологу лаборатории химии минерального сырья Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН С.Т. Неверову за проведение элементного анализа.

Литература

1. Родин А.З., Попова Н.Я., Стукушин М.Н., Лободюк В.Д., Кандыба Е.В. Биологический способ реабилитации почв, подвергающихся интенсивной химизации в лесных питомниках // Лесной вестник. 1998. № 3. С. 104–107.
2. Colla G., Roupheal Y. Biostimulants in horticulture // Sci. Hortic. 2015. V. 196. P. 1–2. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.044
3. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия растительного сырья. 2017. № 2. С. 171–180. doi: 10.14258/jcprgm.2017021720
4. Кириенко М.А., Гончарова И.А. Пролонгированное влияние стимуляторов роста на морфометрические показатели трёхлетних сеянцев основных лесообразующих видов Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2018. № 1. С. 65–70. doi: 10.15372/SJFS20180107
5. Гродницкая И.Д., Полякова Г.Г., Сенашова В.А., Пашкеева О.Э., Пашенова Н.В., Антонов Г.И., Баглаев А.Ю. Влияние обработки семян сосны обыкновенной биопрепаратами на повышение качества посадочного материала в лесных питомниках Красноярского края // Сибирский лесной журнал. 2021. № 3. С. 3–16. doi: 10.15372/SJFS20210301
6. Горбунова С.В., Сеньков А.О., Файзулин Д.Х. Опыт применения гуминового препарата при выращивании сеянцев хвойных пород с закрытой корневой системой в условиях Архангельской области // Сибирский лесной журнал. 2022. № 1. С. 41–51. doi: 10.15372/SJFS20220104
7. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А. Современные представления о биостимуляторах // Агрохимия. 2014. № 7. С. 85–90.
8. Горбылева Е.Л., Боровский Г.Б. Биостимуляторы роста и устойчивости растений терпеноидной природы и другие биологически активные соединения, полученные из хвойных пород // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 4. С. 32–41. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-32-41
9. Хуршайнен Т.В., Андреева Е.М., Стеценко С.К., Терехов Г.Г., Кучин А.В. Влияние биопрепаратов Вэрва и Вэрва-ель на рост сеянцев сосны обыкновенной //

Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 295–300. doi: 10.14258/jcpr.2019014248

10. Тарасов С.С., Михалёв Е.В., Речкин А.И., Крутова Е.К. Регуляторы роста и развития растений: классификация, природа и механизм действия // Агрехимия. 2023. № 9. С. 65–80. doi: 10.31857/S0002188123090120

11. Hurshkainen T.V., Nikonova N.N., Nazarova Y.I., Shirokikh A.A., Bokov N.A., Shirokikh I.G., Kuchin A.V. Study of biocidal properties in extractive substances from coniferous wood greenery // Химия растительного сырья. 2025. № 1. doi: 10.14258/jcpr.20250115053

12. Хуршкайнен Т.В., Скрипова Н.Н., Кучин А.В. Сравнительная оценка экстракционного оборудования для эффективного выделения экстрактивных веществ хвойной древесной зелени // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 25–30. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-025-030

13. Наставления по выращиванию посадочного материала древесных и кустарниковых пород в лесных питомниках Уральского региона. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 172 с.

14. Веселкин Д.В. Функциональное значение микоризообразования у однолетних семян сосны и ели в лесных питомниках // Вестник ОГУ. 2006. № 4S (54). С. 12–18.

15. Использование ядерной древесины в лесоводственных исследованиях. Методические рекомендации / Под ред. И.А. Турчинской. Л.: ЛенНИИЛХ, 1988. 43 с.

16. Смирнов В.В. Сезонный рост главнейших древесных пород. М.: Наука, 1964. 167 с.

17. Hurshkainen T.V., Stetsenko S.K., Andreeva E.M., Shkurikhin A.O., Terekhov G.G., Kuchin A.V. The stimulating properties of spruce wood greenery extract obtained in accordance with the principles of “green technology” // Химия растительного сырья. 2024. № 2. С. 420–428. doi: 10.14258/jcpr.20240212689

18. Расписание погоды [Электронный ресурс] <http://rp5.ru> (Дата обращения: 23.04.2024).

19. Погода и климат [Электронный ресурс] <http://www.pogodaiklimat.ru> (Дата обращения: 23.04.2024).

20. Andreeva E.M., Stetsenko S.K., Hurshkainen T.V., Terekhov G.G., Kuchin A.V. The mycorrhization of the root system of Scots pine with different granulometric composition of the soil under the influence of bio-stimulants in the Middle Urals // AIP Conference Proceedings. 2022. Article No. 030003. doi: 10.1063/5.0069142

21. Ильин В.Б. Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 130 с.

22. Никонов В.В., Сизов И.И., Иванов Г.А., Баскова Л.А. Особенности минерального состава хвои сосны обыкновенной в природе и лесокультуре на Кольском Севере // Бюллетень ГБС. 1984. № 134. С. 62–66.

23. Хабарова Е.П., Феклистов П.А., Кошелева А.Е. Содержание минеральных элементов в отмирающей хвое сосны на осушенных площадях // Лесной вестник. 2015. № 2. С. 15–20.

References

1. Rodin A.Z., Popova N.Ya., Stukushin M.N., Lobodyuk V.D., Kandyba E.V. Biological method for the rehabilitation of soils subjected to intensive chemicalization in forest nurseries // Forestry Bulletin. 1998. No. 3. P. 104–107 (in Russian).

2. Colla G., Roupheal Y. Biostimulants in horticulture // Sci. Hortic. 2015. V. 196. P. 1–2. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.044

3. Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of application of a conifer-derived chemical on the growth and elemental composition of *Pinus sylvestris* L. seedlings in a forest nursery // Chemistry of Plant Raw Material. 2017. No. 2. P. 171–180 (in Russian). doi: 10.14258/jcpr.2017021720

4. Kirienko M.A., Goncharova I.A. The prolonged influence of growth stimulants on morphometric indicators of three-year seedlings of main forest forming species of Central Siberia // Sibirskij Lesnoj Zhurnal. 2018. No. 1. P. 65–70 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20180107

5. Grodnitskaya I.D., Polyakova G.G., Senashova V.A., Pashkeeva O.E., Pashenova N.V., Antonov G.I., Baglaev A.Yu. Treatment of Scots pine seeds by biological preparations as a way of improving the planting material quality in forest nurseries of Krasnoyarsk Krai // Sibirskij Lesnoj Zhurnal. 2021. No. 3. P. 3–16 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20210301

6. Gorbunova S.V., Sen'kov A.O., Fayzulin D.H. The experience of using a humic preparation for growing coniferous ball-rooted seedlings in the conditions of Arkhangelsk Oblast // Sibirskij Lesnoj Zhurnal. 2022. No. 1. P. 41–51 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20220104

7. Yakhin O.I., Lubyanova A.A., Yakhin I.A. Modern concepts on biostimulators // Agrokimiya. 2014. No. 7. P. 85–90 (in Russian).

8. Gorbyleva E.L., Borovskii G.B. Growth and stability biostimulators for plants containing terpenoids and other biologically-active compounds // Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya. 2018. V. 8. No. 4. P. 32–41 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-4-32-41

9. Khurshkaynen T.V., Andreyeva Ye.M., Stetsenko S.K., Terekhov G.G., Kuchin A.V. Influence of bio-preparation Verva and Verva-spruce on the Scots pine seedlings growth // Chemistry of Plant Raw Material. 2019. No. 1. P. 295–300 (in Russian). doi: 10.14258/jcpr.2019014248

10. Tarasov S.S., Mikhalev E.V., Rechkin A.I., Krutova E.K. Plant growth and development regulators: classification, nature and mechanism of action // Agrokimiya. 2023. No. 9. P. 65–80 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188123090120

11. Hurshkainen T.V., Nikonova N.N., Nazarova Y.I., Shirokikh A.A., Bokov N.A., Shirokikh I.G., Kuchin A.V. Study of biocidal properties in extractive substances from

coniferous wood greenery // Chemistry of Plant Raw Material. 2025. No. 1. doi: 10.14258/jcprm.20250115053

12. Hurshkainen T.V., Skripova N.N., Kutchin A.V. Comparative assessment of extraction equipment for efficient isolation of extractives of coniferous wood greenery // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 25–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-025-030

13. Instructions for growing planting material of tree and shrub species in forest nurseries of the Ural region. Moskva: VNIITs Lesresurs, 1998. 172 p. (in Russian).

14. Veselkin D.V. Functional meaning of mycorrhiza formation of annual pine and fir seedling in pinetum // Vestnik OGU. 2006. No. 4S (54). P. 12–18 (in Russian).

15. Use of wood kerns in silvicultural research. Methodological recommendations / Ed. I.A. Turchinskaya. Leningrad: LenNIILKh, 1988. 43 p. (in Russian).

16. Smirnov V.V. Seasonal growth of the main tree species. Moskva: Nauka, 1964. 167 p. (in Russian).

17. Hurshkainen T.V., Stetsenko S.K., Andreeva E.M., Shkurikhin A.O., Terekhov G.G., Kutchin A.V. The stimulating properties of spruce wood greenery extract obtained in accordance with the principles of “green tech-

nology” // Chemistry of Plant Raw Material. 2024. No. 2. P. 420–428. doi: 10.14258/jcprm.20240212689

18. Weather schedule [Internet resource] <http://rp5.ru> (Accessed: 04.23.2024) (in Russian).

19. Weather and climate [Internet resource] <http://www.pogodaiklimat.ru> (Accessed: 23.04.2024) (in Russian).

20. Andreeva E.M., Stetsenko S.K., Hurshkainen T.V., Terekhov G.G., Kutchin A.V. The mycorrhization of the root system of Scots pine with different granulometric composition of the soil under the influence of bio-stimulants in the Middle Urals // AIP Conference Proceedings. 2022. Article No. 030003. doi: 10.1063/5.0069142

21. Ilyin V.B. Elemental chemical composition of plants. Novosibirsk: Nauka, 1985. 130 p. (in Russian).

22. Nikonov V.V., Sizov I.I., Ivanov G.A., Baskova L.A. Features of the mineral composition of Scots pine needles in nature and silviculture in the Kola North // Bulletin of the Main Botanical Garden. 1984. No. 134. P. 62–66 (in Russian).

23. Habarova E.P., Feklistov P.A., Kosheleva A.E. Contents of mineral elements in the dying off needles of Scotch pine on drained areas // Forestry Bulletin. 2015. No. 2. P. 15–20 (in Russian).

Постпирогенные почвы лиственничных лесов Чарской котловины (Северное Забайкалье)

© 2025. Ю. К. Васильчук, д. г.-м. н., профессор, А. П. Гинзбург, м. н. с.,
А. К. Васильчук, д. г. н., в. н. с., Н. А. Буданцева, к. г. н., с. н. с.,
Дж. Ю. Васильчук, к. г. н., м. н. с.,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru

С целью изучения влияния пожаров на свойства почв постпирогенных ландшафтов в межгорных котловинах северного Забайкалья изучены профили почв на первой голоценовой террасе реки Чары в месте впадения в неё ручья Беленького (Забайкальский край, Россия). Почвы подверглись воздействию двух лесных пожаров в 1994 и 2019 гг. Исследованные почвы были классифицированы как глеезёмы, подтипа мерзлотные (Cryosols Glacic). Во всех почвах выявлены признаки пирогенеза. Значения $pH_{\text{вод}}$ почв варьируют в диапазоне от 3,9 до 5,1, pH_{KCl} – от 3,5 до 4,9, гидролитической кислотности – от 3,3 до 4,5 ммоль(экв)/100 г. Установлено, что пирогенный процесс не оказывает существенного влияния на кислотность почвы. Общее содержание органического углерода, достигающее в постпирогенных горизонтах почв 8,7%, увеличивается в результате выгорания растительного покрова и органогенного горизонта почвы. Почвы характеризуются высоким содержанием частиц с диаметром от 0,01 до 0,25 мм (более 35%), при этом постпирогенные горизонты обеднены тонкими фракциями (<0,01 мм). Явным признаком прошедшего пожара является вынос из почв Si, Al, Sr, Zr и Rb. Коэффициенты радиальной дифференциации макроэлементов в профилях почв имеют значения 0,5–0,7 (Al) и 0,7–0,9 (Si). Для макроэлементов в составе недавно выгоревших горизонтов характерен вынос ($R_{\text{Sr}}=0,2$, $R_{\text{Zr}}=0,2$, $R_{\text{Rb}}=0,8$), а в более старом постпирогенном горизонте, наоборот, наблюдается сильное накопление этих макроэлементов: $R_{\text{Sr}}=4,0$, $R_{\text{Zr}}=7,7$, $R_{\text{Rb}}=3,1$. Полученные данные помогут установить влияние пирогенного фактора на физико-химические свойства почв, подвергшихся выгоранию.

Ключевые слова: физико-химические свойства почв, лесные пожары, пост-пирогенная трансформация, профильные распределения.

Post-pyrogenic soils of the Chara Depression larch forests (North Transbaikalia)

© 2025. Yu. K. Vasil'chuk ORCID: 0000-0001-5847-5568*
A. P. Ginzburg ORCID: 0000-0002-7879-5419*, A. C. Vasil'chuk ORCID: 0000-0003-1921-030X*
N. A. Budantseva ORCID: 0000-0003-4292-5709*, J. Yu. Vasil'chuk ORCID: 0000-0002-4855-8316*
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory St., Moscow, Russia, 119991,
e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru

We looked at the soil profiles on the first Holocene terrace of the Chara River, where the Belen'kiy stream flows into it (Transbaikalia, Russia), to find out how wildfires change the post-pyrogenic soil properties in the intermontane depressions of North Transbaikalia. In 1994 and 2019 forest fires affected the soil. Studied soils were classified as gleysols of the permafrost subtype (Cryosols Reductaquic Pyric). All soils showed signs of pyrogenesis. Values of pH_{water} varied within the range of 3.9–5.1, pH_{KCl} – varied from 3.5 to 4.9, and hydrolytic acidity varied from 3.3 to 4.5 cmol(+)/kg. Thus, the pyrogenic process did not impact the soil solution pH significantly. Total organic carbon content, which reached 8.7% in post-pyrogenic soil horizons, probably increased as a result of vegetation combustion. Soils have a lot of particles with sizes between 0.01% and 0.025 mm (more than 35%), and after the fire, the post-pyrogenic horizons lose most of the fine particles (<0.01 mm). The leaching of Si, Al, Sr, Zr, and Rb is an explicit indication of wildfire transformation. The radial differentiation coefficients of macroelements were 0.5–0.7 (Al) and 0.7–0.9 (Si) in the soil profiles. Recently burnt soil horizons were characterized by the depletion of trace elements ($R_{\text{Sr}}=0.2$, $R_{\text{Zr}}=0.2$, $R_{\text{Rb}}=0.8$), however in the older post-pyrogenic horizon, oppositely, the strong accumulation of these trace elements was observed: $R_{\text{Sr}}=4.0$, $R_{\text{Zr}}=7.7$, $R_{\text{Rb}}=3.1$. These data will aid in determining the influence of pyrogenic factors on the physical and chemical characteristics of soils exposed to combustion.

Keywords: physical and chemical soils properties, forest fires, post pyrogenic transformation, profile distributions.

Одним из экологических последствий природных пожаров в Сибири, где расположена большая часть лесов и болот России [1–5], является загрязнение атмосферы. Горение биомассы активизирует эмиссию продуктов горения и парниковых газов в атмосферу [6–10]. Пожары в зоне развития многолетнемерзлых пород воздействуют на окружающую среду как импульсный триггер, который мобилизует углерод за счёт сжигания растительности и поверхностных органических слоёв почвы. В некоторых случаях, дополнительное высвобождение углерода происходит за счёт протаивания многолетнемерзлых пород [9]. Увеличение числа пожаров в криолитозоне оказывает существенное влияние на растительность, круговорот углерода и питательных веществ, а также стабильность рельефа [10, 11]. Увеличение интенсивности и частоты пожаров способствует развитию альтернативных сукцессий и переходу от хвойных лесов к лиственным, которые характеризуются значительными различиями в накоплении и круговороте углерода и азота по сравнению с хвойными лесами [12]. Лесные пожары изменяют морфологическое строение мерзлотных почв: формируется пирогенный слой, проявляются пиро- и криотурбации, изменяется глубина протаивания и водный режим мерзлотных почв [13]. Проявление глобальных изменений в условиях повышенной континентальности климата в Прибайкальском регионе сопровождается увеличением площадей лесных пожаров и опасностью невозврата постпирогенных экосистем в лесные [14, 15]. Воздействие природных пожаров на почвы представляется важным фактором почво-образования, формирующим специфические полициклические постпирогенные почвы [16] и постпирогенные признаки горизонтов почв, содержащих обугленные растительные остатки. При этом угольки прослеживаются на микро- и субмикроморфологическом уровнях. Почвы с полициклическим профилем, содержащие, помимо современного, ещё несколько погребённых гумусовых горизонтов с обильным включением чёрных древесных углей формируются в трансаккумулятивных фациях ландшафтов в ландшафтно-климатических условиях Центральной и Южной Якутии, а также Забайкалья [16].

Поскольку отсутствует единая точка зрения на оценку влияния пожаров на изменение почвенного покрова в современной классификации почв России, нет оснований для отнесения почв ствола постпирогенных

к подтипу постпирогенных, поскольку этот подтип выделен только для отдела торфяных ствола органогенных почв [17]. Постпирогенные почвы не адекватно отражены в современных классификациях, несмотря на значительную роль пожаров в их развитии, хотя многие исследователи [14–24] в своих работах отмечают, что в формировании постпирогенных почв роль пожаров весьма и весьма значительная. Сложность выделения пирогенных таксонов состоит в отсутствии единой точки зрения на оценку влияния пожаров на изменение почвенного функционирования. Поскольку пирогенные морфологические признаки в почвах сохраняются до 150 лет, и отражают развитие почв, было предложено выделение универсального подтипа «пирогенный» (pir) [18–25].

Индекс «pir» и термин «постпирогенный» используются в данной работе применительно к глеезёмам, чтобы выделить причину изучаемой трансформации свойств почв и самовосстановления их свойств. Наиболее часто при изучении постпирогенной динамики почвенных свойств исследуются почвы гарей разных возрастов и фоновые участки, на которых пожаров не было [14, 22–25]. Предметом изучения является динамика содержания органического углерода, азота, изменения гранулометрического состава кислотности почв после пожаров [14, 16, 18, 19].

Целью работы было изучение постпирогенных почв Чарской котловины, пройденных низовыми пожарами разной интенсивности в 1994 и 2019 гг., исследование их классификационных признаков, динамики почвенной кислотности, содержания $C_{орг}$, гранулометрического состава и радиальной дифференциации концентраций макро- и микроэлементов в профилях почв.

Объекты и методы исследования

Территория Чарской котловины располагается в Каларском районе Забайкальского края [26], рельеф её дна представляет собой широкую выровненную поверхность в долине р. Чары (рис. 1), сложенную голоценовым русловым ($Q^1_{IV} - Q^2_{IV}$) аллювием [7]. Это район резко континентального климата, среднегодовая температура воздуха $-7,8\text{ }^\circ\text{C}$, среднегодовое количество осадков 328 мм [27]. Многолетнемерзлые породы (ММП) характеризуются сплошным распространением по площади со средними температурами от -6 до $-4\text{ }^\circ\text{C}$ [28]. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) от 0,5

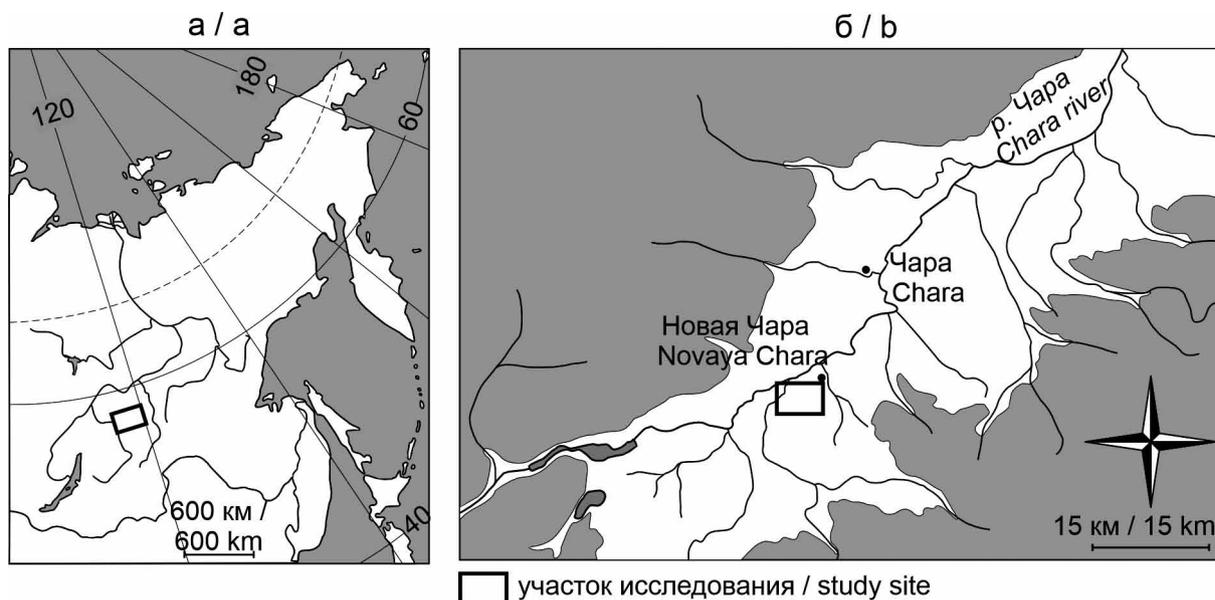


Рис. 1. Схема расположения ключевого участка исследований в пределах азиатской части России (а) и Чарской котловины (б)
 Fig. 1. Schematic location of the studied key-site within the Asian part of Russia (a) and the Chara Depression (b)

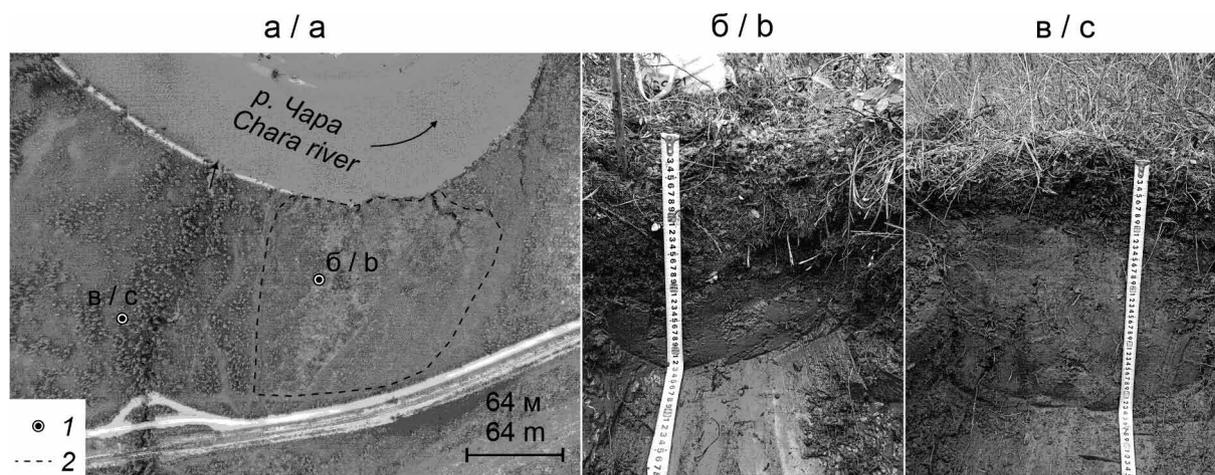


Рис. 2. Расположение почвенных разрезов на ключевом участке (а) и профили глеезёмов после пожаров возрастом 3 года (б) и 28 лет (в): 1 – местоположения заложённых почвенных разрезов; 2 – граница выгоревшей в 2019 г. площади
 Fig. 2. Soil pits location scheme at the key-site (a) and gleysols profiles after 3- (b) and 28-year old (c) wildfires: 1 – studied soil pits locations; 2 – area burnt in 2019

до 0,9 м [29]. Особенностью является широкое распространение подземных льдов, например, раннеголоценовых и современных сингенетических повторно-жильных льдов [30].

Изучены физико-химические свойства постпирогенных почв в долине р. Чары (рис. 2) и их динамика через 3 и 28 лет после пожаров (рис. 3).

Почвенные разрезы были заложены в долине р. Чары на кочковатой субгоризонтальной заболоченной поверхности 7-метровой террасы, которую пересекает ручей Беленький (56°45'38,72" с. ш., 118°11'30,12" в. д.)

(рис. 2а). Разрез Ch-S-22-1 заложен на правом берегу ручья в заболоченном редкостойном постпирогенном лиственничном лесу (рис. 2б), в котором разбита площадка сети CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) [31]. Возраст гари здесь составляет 3 года. Разрез Ch-S-22-2 находится на левом берегу ручья в более густом лиственничнике без признаков заболачивания (рис. 2в). Из профилей почв по генетическим горизонтам были отобраны образцы почв. Возраст гари 28 лет.

Профили этих почв в полевых условиях были описаны и систематизированы по клас-

сификации и диагностике почв России [17] и полевому определителю почв [32], а также согласно международной классификации [33]. Пробоподготовка была выполнена в соответствии с методиками, описанными в [34]. Кислотность в водной (актуальная), хлоридно-калиевой (обменная) и ацетатно-натриевой (гидролитическая) вытяжках была определена потенциометрически водородно-селективным электродом **Mettler Toledo** [34]. **Общее содержание органического углерода** ($C_{орг.}$) в почвах определялось методом мокрого сжигания И.В. Тюрина с титриметрическим окончанием. Гранулометрический состав почв был определён на лазерном гранулометре **Fritsch Analysette 22** (Германия). Частицы физической глины (с диаметром <10 мкм) исследовались для классификации почв по системе Н.А. Качинского. Гранулометрический состав органических горизонтов определялся в содержащейся в них минеральной части. Валовой элементный состав был исследован портативным горно-геологическим рентген-флуоресцентным анализатором (РФА) **Olympus Delta Professional** (США). Контрастность профильного (радиального) распределения оценивалась по коэффициенту радиальной дифференциации R [35], который вычисляется по формуле:

$$R_x = \frac{R_{x(горизонт)}}{R_{x(порода)}},$$

где $R_{x(горизонт)}$ – содержание химического элемента x в почвенном горизонте; $R_{x(порода)}$ – его содержание в горизонте почвообразующей породы.

Статистическая обработка данных и построение графиков было осуществлено в **Microsoft Excel-2022**. **Графическое сопровождение** выполнено в векторном графическом редакторе **CorelDRAW-2022**.

Результаты и обсуждение

Описанные почвы отнесены к стволу пост-литогенного почвообразования, отделу глеевых почв, типу глеезёмов [6]. Для строения обоих профилей характерна последовательность горизонтов $O - G - CG$. На глубинах 34 и 44 см в разрезах горизонты мёрзлые (CG^{\perp}). Общим для этих почв является подтип мерзлотные [17]. Важной особенностью обоих разрезов является наличие угольков в горизонте O , что даёт основание для введения подтипа постпирогенные ($Opir$) в их названия. Также необходимо отметить наличие горизонта Gox – окисленно-глеевого, в профиле $Ch-S-22-2$. Возникает этот признак в результате понижения уровня грунтовых вод, что также косвенно свидетельствует о недавнем пожаре, в результате которого мощность $СТС$ возрастает. Поверхностные органические горизонты почв были отнесены к подстильно-торфяным (O), а не к торфяным (T) из-за низкого для горизонтов T содержания органического углерода – до 8,7%, и из-за перемешанности этих горизонтов с большим количеством минеральных частиц, что не характерно для T [17].

Влияние пирогенеза на мерзлотные почвы было подробно исследовано в работе [36]. Специфика образования пирогенно-трансформированных мерзлотных почв

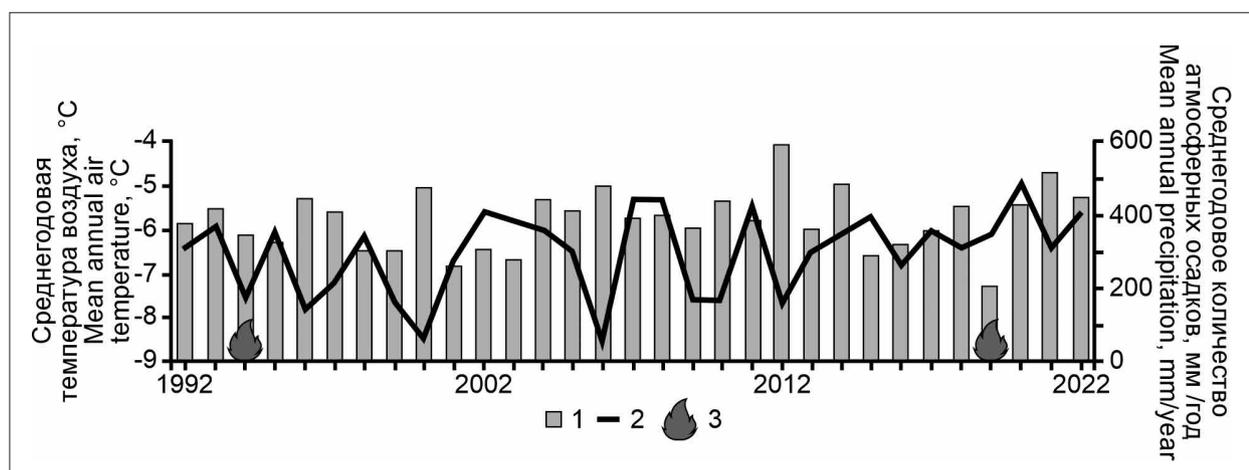


Рис. 3. Динамика климатических параметров (по данным метеорологической станции Чара) за последние 30 лет: 1 – среднегодовое количество атмосферных осадков, мм/год; 2 – среднегодовая температура воздуха, °С; 3 – годы прохождения пожаров

Fig. 3. Climate parameters dynamics (according to the data of “Chara” weather station) in the last 30 years: 1 – mean annual precipitation, mm/year; 2 – mean annual air temperature, °C; 3 – years of wildfires

в межгорных котловинах Байкальского региона была рассмотрена в работе [18]. Было установлено, что в составе пирогенных погребённых гумусовых горизонтов отмечается увеличение содержания гумуса и азота, а также фракций физической глины, ила и обменных оснований Ca^{2+} и Mg^{2+} . Профильное строение так называемых полициклических почв в трансаккумулятивных фациях ландшафтов Центральной и Южной Якутии и Забайкалья исследовано в работе [16]. Постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв были показаны на примере изменения показателей дерново-карбонатной выщелоченной почвы в послепожарный период (1985–1992 гг.). Было установлено, что суммарное послепожарное уменьшение (на 21 см) мощности почвы обусловлено в большей мере термопросадкой (46% от общей потери мощности) почвенного мелкозёма и в меньшей мере – его поверхностным смывом (28%) и выгоранием (минерализацией) органогенной части почвенного профиля (26%) [18]. При пирогенной трансформации мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии также наблюдалось образование почв с полициклическим профилем сложного строения, включающего в своем составе 2–3 погребённых деградированных пирогенных гумусовых горизонта с обильным включением чёрных древесных углей [18]. Следовательно, в результате пожаров происходило 2–3 цикла почвообразования. Постпирогенные прослои и горизонты таких почвенных профилей значительно отличаются от природных негоревших аналогов по морфологическому и микроморфологическому строению, элементному составу, зольности органического вещества [16]. Установлено также, что экспозиция склонов, на которых происходит пожар, влияет на морфологические и биологические свойства почв, особенно в криолитозоне [3].

Актуальная кислотность ($\text{pH}_{\text{вод.}}$) исследованных нами почв – глеезёма постпирогенного мерзлотного и глеезёма окисленно-глеевого постпирогенного мерзлотного – варьирует от 3,9 до 5,1, обменная кислотность (pH_{KCl}) – от 3,5 до 4,9, гидролитическая кислотность ($\text{H}_{\text{г}}$) – от 3,3 до 4,5 ммоль(экв)/100 г. Реакции профилей соответствуют грациям от сильнокислых (<4,5) до слабокислых (5,1–5,5). Близкие значения реакции среды почвенных профилей (от 4,0 до 6,3) описаны при изучении почв ландшафтного заказника регионального значения «Ингамакитский» [37]. Почвы межгорных котловин Забайкалья более щелочные – значе-

ния $\text{pH}_{\text{вод.}}$ находятся в интервале 5,9–7,9 [38]. Близкие к нейтральным и даже слабощелочные реакции (до 8,3) связаны с неглубоким залеганием карбонатных почвообразующих пород на горных хребтах и в котловинах [39]. В отличие от них, почвы сосновых лесов Прибайкалья на песчаных почвах имеют кислую реакцию. При этом постпирогенные горизонты почв отличаются более кислой реакцией среды, чем минеральные. Это связано с большей степенью разложения органических остатков в горизонтах **Ориг** из-за их разрушения в процессе пирогенеза. Пирогенный процесс сглаживает резкость изменения pH при переходе от верхней части профилей к нижним [15]. Аналогичные трансформации происходят и с pH_{KCl} , значения которых изменяются с 4,4–4,8 до 5,1–5,3. Гидролитическая кислотность, как отмечено в работах [15, 39], также значительно снижается с глубиной почвенного разреза.

В органогенных горизонтах почв содержится 8,7 и 6,8% $\text{C}_{\text{орг.}}$. Наблюдается резкое снижение содержания $\text{C}_{\text{орг.}}$ от верхних горизонтов к нижним, при этом содержание органического углерода в горизонтах, подвергшихся пожару в 1994 г., выше, чем в горизонтах, горевших в 2019 г. Содержание $\text{C}_{\text{орг.}}$ в альфегумусовых почвах Забайкалья варьирует в пределах 1,6–15,0% гумуса [38]. Органогенные горизонты почв содержат в 6–10 раз больше гумуса, чем минеральные [15, 39]. В более старом постпирогенном горизонте наблюдается пониженное содержание гумуса по сравнению с недавно выгоревшим. Горизонты CG и G^{\perp} характеризуются относительно монотонными профильными распределениями $\text{C}_{\text{орг.}}$. Поверхностные органогенные горизонты современных и палеопочв Байкальского региона содержат от 2,1 до 8,0% $\text{C}_{\text{орг.}}$, а к нижней части профиля значения снижаются до 0,2–0,6% [8]. Такие низкие содержания, предположительно, связаны с диагенетическими изменениями органического вещества в глубоких горизонтах почв [40], приводящих к минерализации углерода. Влияние пирогенеза на содержание $\text{C}_{\text{орг.}}$ в почвах не одинаково в разных регионах [16, 40].

Содержание физической глины в почвенном разрезе Ch-S-22-1 в среднем по профилю выше в 2–3 раза, чем в разрезе Ch-S-22-2 (табл. 1). Почвы относятся к супесчаным. Для сравнения, в песчаных почвах хвойных лесов Байкальского региона более лёгкий гранулометрический состав, совокупное содержание физической глины там колеблется от 3 до 10% [15]. В работе [19] почвы характеризуются

Таблица 1 / Table 1

Содержание гранулометрических фракций в горизонтах почв / Particle content in soil horizons

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Диаметр частиц, мм / Particle size, mm						
		≥1	0,25–1	0,05–0,25	0,01–0,05	0,005–0,01	0,001–0,005	≤0,001
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11	–	–	–	–	–	–	–
G	20(25)–26(30)	0,3	2,9	48,2	24,9	11,9	7,2	4,6
CG [⊥]	26(30)–34...	0,0	4,0	24,8	47,7	9,4	9,3	4,8
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11(13)	–	–	–	–	–	–	–
G	11(13)–18(25)	0,0	0,9	54,6	33,3	3,8	5,8	1,6
CG [⊥]	18(25)–44...	0,0	4,0	32,2	49,0	6,0	7,2	1,6

Примечание: прочерк в таблице обозначает, что определения не выполнялись.
Note: a dash means that the contents were not measured.

Таблица 2 / Table 2

Концентрации макроэлементов в почвах долины р. Чары (%)
Major element concentration in soils of the Chara River valley (%)

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Концентрация элементов, % / Element concentration, %							
		Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Mn	Fe
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)									
Opir	0–11	3,2	1,1	5,8	0,03	0,7	0,2	0,03	2,7
G	20(25)–26(30)	2,8	0,9	8,1	0,09	1,2	0,3	0,04	3,4
CG [⊥]	26(30)–34...	1,6	1,2	8,7	0,08	1,4	0,4	0,10	3,7
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)									
Opir	0–11(13)	4,8	1,8	11,6	0,09	1,5	0,4	0,04	3,4
G	11(13)–18(25)	2,9	1,2	8,1	0,10	1,4	0,4	0,05	4,1
CG [⊥]	18(25)–44...	2,6	2,6	24,3	0,08	0,2	0,2	0,10	0,6

лёгким гранулометрическим составом, при этом содержание фракции физической глины варьирует от 12 до 56%. Чаще всего содержание физической глины в профилях снижается с глубиной в 2–3 раза. В Юго-Восточном Прибайкалье отмечены более монотонные распределения фракции физической глины (от 3,02 до 9,99%), при этом также наблюдается снижение её концентрации к нижней части почвенных профилей [15].

Установлены следующие интервалы содержания макроэлементов в изученных почвах: Mg (1,6–4,8%), Al (0,9–2,6%), Si (5,8–24,3%), P (0,03–0,1%), Ca (0,2–1,5%), Ti (0,2–0,4%), Mn (0,03–0,1%), Fe (0,6–4,1%) (табл. 2).

Наибольшими концентрациями характеризуются Si, Fe и Mg со средними содержаниями, равными 11,1; 3,0 и 3,0%, соответственно.

Эти элементы распределены наиболее контрастно в профилях почв, R-коэффициенты Mg, Si и Fe равны 1,8–2,1; 0,3–0,9 и 0,7–6,7, соответственно (рис. 4).

В почвах Прибайкалья под хвойными лесами в дельте р. Селенги следующие концентрации макроэлементов: Si (68,3–75%), Ti (0,22–0,41%), Al (12,6–13,7%), Fe (1,5–2,24%), Mn (0,04–0,08%), Mg (0,43–0,62%), Ca (1,71–1,73%), Na (3,16–3,78%), K (2,88–3,28%), P (0,14–0,21%). Наиболее существенно из пирогенных горизонтов выносятся Si (70% против 73,4–75%), Al (12,8% против 13,3–13,7%) и K (2,97% против 3,09–3,28%), а накапливаются Mn (0,08% против 0,04–0,05%) и Ca (1,91% против 1,71–1,73%) [15]. Весьма контрастно профильное распределение Ca, R-коэффициент которого в исследованных горизонтах почв составляет от 0,5 до 9,8. Верх-

няя часть профиля почвы Ch-S-22-1 обеднена Ca, Ti и Fe ($R=0,5-0,9$) (рис. 4а), а в почве Ch-S-22-2 верхняя часть профиля, напротив, обогащена ими ($R=2,0-9,8$) (рис. 4б).

Микроэлементы в составе исследованных почв содержатся в следующих диапазонах: Zn (8,5–2,0 мг/кг), Rb (3,3–10,2 мг/кг), Sr (5,0–29,7 мг/кг), Y (0,7 – 4,9 мг/кг), Zr (5,6–47,1 мг/кг), Nb (0,9–4,1 мг/кг) и Pb (1,0–4,5 мг/кг) (табл. 3). Наибольшими средними концентрациями отличаются Zr (30,4 мг/кг) и Sr (20,7 мг/кг), средние содержания остальных исследованных микроэлементов в 3–5 раз ниже. Содержания Zn и Pb в почвах сосновых лесов Западного Забайкалья значительно выше, чем в изученных нами почвах Чарской котловины – от 13,3 до 113,9 и от 20,3 до 49,6 мг/кг, соответственно [40].

Микроэлементы, за исключением Rb, Sr и Zr, отличаются сходными тенденциями профильных распределений в обоих профилях почв. Верхние части профилей почв Ch-S-22-1 и Ch-S-22-2 обеднены Zn, Y, Nb и Pb (рис. 5), причём недавно выгоревший горизонт O обеднён ими сильнее, чем пройденный пожаром 28 лет назад Opir (рис. 5). Если Rb распределён в профиле почвы Ch-S-22-1 относительно слабоконтрастно ($R=0,8$), то Sr и Zr, напротив, очень слабо закрепляются в верхней части профиля этой почвы, особенно в поверхностном органогенном горизонте O ($R=0,2$) (рис. 5а).

Во втором профиле, напротив, значения коэффициента R показывают сильное накопление Rb, Sr и Zr в верхней его части. Здесь они имеют значения 3,1 (Rb), 3,6–4,0 (Sr) и

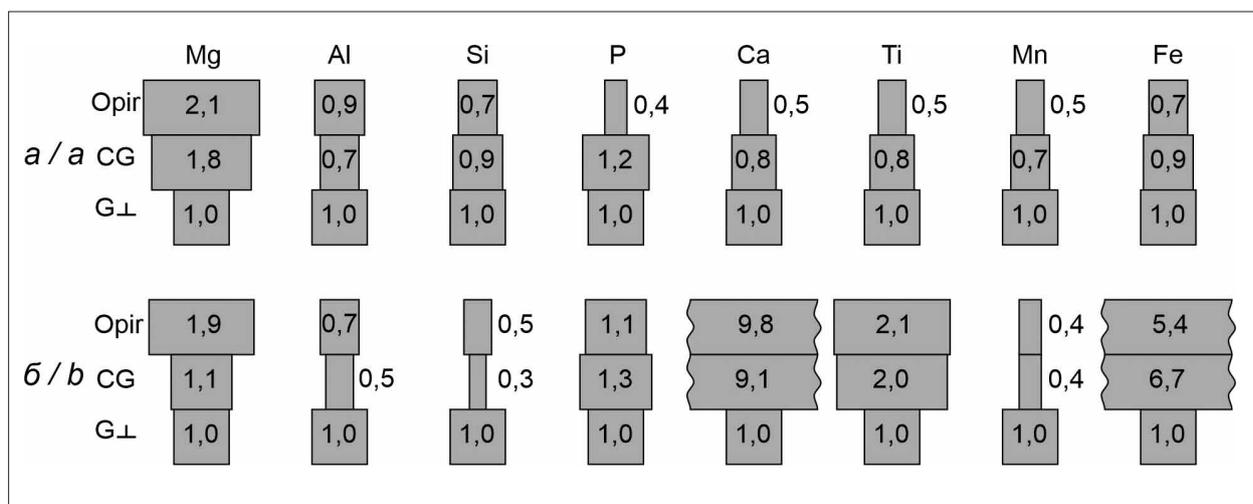


Рис. 4. Коэффициенты радиальной дифференциации (R) макроэлементов в разрезах почв Ch-S-22-1 (а) и Ch-S-22-2 (б)

Fig. 4. Radial differentiation ratios (R) of macroelements in Ch-S-22-1 (a) and Ch-S-22-2 (b) soil pits profiles

Таблица 3 / Table 3

Концентрации микроэлементов в почвах долины р. Чары (%)
Trace-element concentration in soils of the Chara River valley (%)

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	Концентрация элементов, мг/кг Element concentration, mg/kg						
		Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb
Разрез Ch-S-22-1. Глеезём постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-1. Gleysol post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11	2,0	8,4	5,0	0,7	10,5	0,9	1,0
CG	20(25)–26(30)	6,6	8,4	25,9	2,6	41,9	2,7	1,8
G⊥	26(30)–34...	5,4	10,2	29,3	3,4	47,1	4,1	2,0
Разрез Ch-S-22-2. Глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный Soil pit Ch-S-22-2. Gleysol oxidized-gleyic post-pyrogenic permafrost (Cryosol Reductaquic Pyric)								
Opir	0–11(13)	6,9	10,2	29,7	2,9	43,1	3,6	1,7
CG	11(13)–18(25)	7,6	10,2	26,8	3,0	34,1	3,8	2,7
G⊥	18(25)–44...	8,5	3,3	7,5	4,9	5,6	4,1	4,5

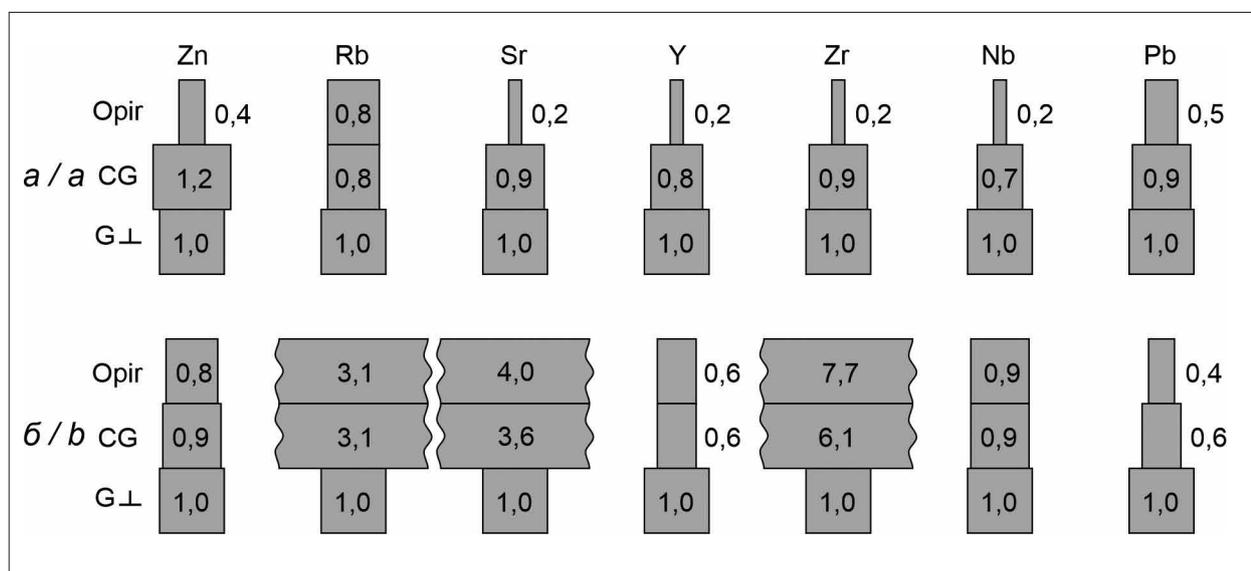


Рис. 5. Коэффициенты радиальной дифференциации (R) микроэлементов в разрезах почв Ch-S-22-1 (а) и Ch-S-22-2 (б)

Fig. 5. Radial differentiation ratios (R) of trace elements in Ch-S-22-1 (a) and Ch-S-22-2 (b) soil pits profiles

6,1–7,7 (Zr) (рис. 5б). Установлено, что под воздействием низовых лесных пожаров незначительно увеличиваются валовые содержания и концентрации подвижных форм Zn, Cu, Pb в слое почв глубиной от 0 до 40 см, а также содержания Zn и Pb в организмах растений на горях [40]. Среди изученных элементов степень интенсивности захвата и накопления распределяется таким образом: Pb, Cr – средний захват; Cd, Co, Ni – среднее накопление; Zn, Cu – среднее и интенсивное накопление. Здесь полученные нами результаты вступают в противоречие с данными работы [40], поскольку в ней продемонстрирован вынос Zn и Pb из пирогенных горизонтов с разной степенью активности ($R_{Zn}=0,4-0,8$ и $R_{Pb}=0,5-0,4$) (рис. 5а, б). Наиболее интенсивно в подстилке концентрируются Zn и Cd, а Pb, Cu, Co и Ni накапливаются слабее (весь ряд концентраций выглядит так: $Zn > Cd > Pb > Cu > Co > Ni$). Среди изученных элементов повышение концентраций Zn, Co, Cd и Pb отмечается в постпирогенных горизонтах почв, а для Cu и Ni характерно снижение концентраций после пожара. Тем не менее, отмечается, что на элементный состав может влиять не только пожар, но и, в меньшей степени, геохимическая обстановка территории [39].

В настоящее время реальные масштабы и частота воздействия антропогенно-пирогенного фактора на светлехвойные леса Забайкалья многократно превосходят естественную эволюционно обусловленную норму. Ключевые участки, представленные в

данном исследовании, в июле 2024 г. подверглись интенсивным пожарам, постпирогенное почвообразование продолжится уже в иных условиях.

Заключение

В почвах долины р. Чары выявлены признаки пирогенеза – обгоревшие остатки подстилки и крупные угольки в горизонте Opig. Описанным глеезёмам был присвоен подтип постпирогенные. Полные названия описанных почв – глеезём постпирогенный мерзлотный (разрез Ch-S-22-1, время с момента пожара – 3 года) и глеезём окисленно-глеевый постпирогенный мерзлотный (разрез Ch-S-22-2, возраст пожара – 28 лет). $pH_{вод}$ варьирует в пределах 3,9–5,1, pH_{KCl} имеют значения 3,5–4,9, Нг – 3,3–4,5 ммоль (экв)/100 г. Кислотность почв, предположительно, не регулируется процессом пирогенеза, а в основном зависит от содержания слабых органических соединений. Общее содержание $C_{орг}$ в изученных почвах достигает 8,7%, а наименьшее составляет 0,9%. Характерно резкое снижение содержания $C_{орг}$ с глубиной почвы. Концентрация органического углерода увеличивается в почвах, поверхностный органогенный горизонт которых был уничтожен пожаром 3 года назад, по сравнению с более старым пожаром. Содержание физической глины варьирует от 4,3 до 16,3%, при этом с глубиной концентрация этой фракции возрастает. Одними из наиболее верных признаков пирогенеза яв-

ляется обеднение подстилочных горизонтов почв такими макроэлементами, как Al и Si, коэффициенты радиальной дифференциации которых имеют значения 0,7–0,9 и 0,5–0,7 соответственно. Многие микроэлементы демонстрируют уменьшение концентраций в свежих постпирогенных горизонтах ($R=0,2-0,8$) и контрастные накопления в более старых постпирогенных горизонтах ($R=3,1-7,7$), что может быть связано с изначальным обогащением минеральных горизонтов почв этими микроэлементами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта РНФ №23-17-00082). Авторы благодарны зав. лаб. геокриологии ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН, к. г.-м. н. Д.О. Сергееву и м. н. с. ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард) В.А. Паламарчук за помощь в организации и проведении полевых работ, а также профессору географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д. б. н. М.И. Герасимовой за помощь в классифицировании и диагностировании почв.

References

1. Atlas of Transbaikalia (Buryat ASSR and Chita Oblast). Moskva, Irkutsk: GUGK, 1967. 176 p. (in Russian).
2. Batuev V.I., Ganul A.G., Novikov S.M. The age of the “relict” bogs of the northern part of West Siberia // TSPU Bulletin. 2015. No. 2 (155). P. 185–191 (in Russian).
3. Bogdanov V.V., Prokushkin S.G. The role of the slope exposition in the after-fire transformation of carbon in the larch forest soils of the central Siberia cryolithozone // Bulletin of KrasGAU. 2015. No. 9. P. 3–8 (in Russian).
4. Swamps of Western Siberia, and their role in the biosphere / Ed. A.A. Zemtov. Tomsk: TGU, SibNIIT, 2000. 72 p. (in Russian).
5. Vazhenina L.N., Lozhkin A.V. Early Holocene peatlands of North-East of Siberia // Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. 2013. No. 5. P. 74–84 (in Russian).
6. Vasil'chuk Yu.K., Ginzburg A.P., Budantseva N.A., Vasil'chuk J. Yu. Cryogenic soils in the Chara River valley, Transbaikalia // Arctic and Antarctic. 2022. No. 3. P. 54–91 (in Russian). doi: 10.7256/2453-8922.2022.3.38689
7. Geological map of the USSR. Scale 1:200,000. Bodaibinskaya series. Sheet O-50-XXIX / Ed. A.M. Leites. Moskva: All-Union Aerogeological Scientific and Production Association “Aerogeology” of the Ministry of Geology of the USSR, 1975 (in Russian).
8. Golubtsov V.A. Stable carbon isotopic composition of Late Pleistocene and Holocene soil organic matter of the Baikal region // Pochvovedenie. 2020. No. 6. P. 673–690 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X20060040
9. Jones B.M., Kanevskiy M.Z., Shur Y., Gaglioti B.V., Jorgenson M.T., Ward Jones M.K., Veremeeva A., Miller E.A., Jandt R. Post-fire stabilization of thaw-affected permafrost terrain in northern Alaska // Sci Rep. 2024. V. 14. No. 1. Article No. 8499. doi: 10.1038/s41598-024-58998-5
10. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Walter Anthony K., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Koven C., Lawrence D.M., Gibson C., Sannel A.B.K., McGuire A.D. Carbon release through abrupt permafrost thaw // Nat. Geosci. 2020. V. 13. P. 138–143. doi: 10.1038/s41561-019-0526-0
11. Du R., Peng X., Frauenfeld O.W., Jin H., Wang K., Zhao Y., Luo D., Mu C. Quantitative impact of organic matter and soil moisture on permafrost // J. Geophys. Res.: Atmos. 2023. V. 128. No. 3. Article No. e2022JD037686. doi: 10.1029/2022JD037686
12. Jafarov E.E., Briones V., Kabeer A., Rogers B.M., Natali S., Gene H., Rutter R.M., Carman T.B. Modeling the implications of post-fire alternative successional trajectory for boreal carbon and permafrost dynamics in Interior Alaska // Proceedings of 12th International Conference on Permafrost. V. 1. Whitehorse, 2024. P. 152–159. doi: 10.52384/ICOP2024.145.1
13. Desyatkin R.V., Nikolaeva M.Ch., Ivanova A.Z., Desyatkin A.R., Okoneshnikova M.V., Filippov N.V. The impact of 2021 large forest fires on vegetation and soils, on the territory of distribution of light soil-forming rocks in Central Yakutia // Dokuchaev Soil Bulletin. 2024. No. 118. P. 231–275 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2024-118-231-275
14. Gyninova A.B., Dyrzhinov Zh.D., Gonchikov B.N., Hamnuyeva T.R. Features of the transformation of soils under the influence of fires in the pine forests of the Baikal region // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Geografiya. 2018. No. 1. P. 44–53 (in Russian). doi: 10.18101/2587-7143-2018-1-44-53
15. Gyninova A.B., Dyrzhinov Zh.D., Kulikov A.I., Gyninova B.D., Gonchikov B.N. Post-pyrogenic evolution of sandy soils under pine forests in the Baikal Region // Pochvovedenie. 2019. No. 4. P. 451–463 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19040087
16. Chevychelov A.P., Shakhmatova E.Y. Postpyrogenic polycyclic soils in the forests of Yakutia and Transbaikalia region // Pochvovedenie. 2018. No. 2. P. 243–252 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18020120
17. Classification and diagnostics of soils in Russia / Ed. G.V. Dobrovolskiy. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Russian).
18. Chevychelov A.P. Pyrogenesis and post-pyrogenic changes of peculiarities and composition of cryomorphic soils // Contemporary Problems of Ecology. 2002. No. 3. P. 273–278 (in Russian).
19. Krasnoshchekov Yu.N. Post-pyrogenic variability of litter in mountain forests of the Pribaikalie region // Pochvovedenie. 2019. V. 52. No. 3. P. 290–303 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19030080

20. Krasnoshchekov Yu.N., Cherednikova Yu.S. Postpyrogenic variability of forest soils in the mountainous Baikal region. Novosibirsk: SB RAS, 2022. 164 p. (in Russian).
21. Dymov A.A. Soils of post-pyrogenic forests // *Eurasian Soil Sc.* 2023. V. 56. Suppl. 1. P. S84–S113. doi: 10.1134/S1064229323700217
22. Bogorodskaya A.V., Kukavskaya E.A., Kalenskaya O.P., Buryak L.V. Changes in the microbiological and physico-chemical properties of soils after fires in pine and birch forests in the central part of the Zabaikal Krai // *Pochvovedenie.* 2023. No. 11. P. 1418–1436 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X23600245
23. Shakhmatova E.Y. Changing the properties of litter and soils on burning in pine forests of Western Transbaikalia // *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2017. V. 22. No. 3. P. 101–106 (in Russian).
24. Chebykina E.Y., Nizamutdinov T.I., Abakumov E.V. Pyrogenic territories study in subtundra forests and sparse taiga zone (on the example of Nadym forestry, YNAO) // *Sustainable development of territories: theory and practice: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* V. 2. Sibai: Sibayskiy informatsionnyy tsentr – filial GUP RB; Izdatelskiy dom “Respublika Bashkortostan”, 2021. P. 285–287 (in Russian).
25. Petrov D.G., Goleva A. A Pyrogenic-extreme soils of the Northern and middle taiga of Russia // *Lomonosov Soil Science Journal.* 2023. No. 1. P. 16–24 (in Russian). doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-16-24
26. Natural conditions of the development of the north of the Chita region / Eds. L. A. Nedeshev, V. S. Preobrazhenskiy. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1962. 124 p. (in Russian).
27. Handbook on the climate of the USSR. No. 23. Buryat ASSR, Chita Oblast. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968. 328 p. (in Russian).
28. Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Perelshtin G.Z., Romanovsky V.E., Bezdelova A.P., Aleksyutina D.M., Bolotyuk M.M., Khimenkov A.N., Karpalova V.N., Motenko R.G., Maleeva A.N. Background geocryological monitoring in northern Transbaikalia region // *Earth’s Cryosphere.* 2016. V. 20. No. 3. P. 24–32 (in Russian). doi: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(24-32)
29. Zabolotnik S.I., Klimovsky I.V. Seasonal thawing and freezing of soils in the Charskaya basin // *Geocryological conditions of the Trans-Baikal North.* Moskva: Nauka, 1966. P. 162–171 (in Russian).
30. Vasil’chuk Yu.K., Vasil’chuk A.C., Stanilovskaya Ju.V. Early Holocene climate signals from stable isotope composition of ice wedge in the Chara Basin, northern Transbaikalia, Russia // *Geosci. Front.* 2018. V. 9. No. 2. P. 471–483. doi: 10.1016/j.gsf.2017.04.008
31. Shiklomanov N.I., Nelson F.E., Streletskiy D.A., Hinkel K.M., Brown J. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: data collection, management, and dissemination strategies // *Ninth International Conference on Permafrost.* V. 2. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. P. 1647–1652.
32. Field soil guide. Moskva: Dokuchaev Soil Institute, 2008. 182 p. (in Russian).
33. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.
34. Theory and practice of chemical analysis of soils / Ed. L.A. Vorobyova. Moskva: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
35. Perelman A.I., Kasimov N.S. Geochemistry of landscape. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1999. 768 p. (in Russian).
36. Tarabukina A.P., Savvinov D.D. The effect of fires on permafrost soils. Novosibirsk: Nauka, 1990. 120 p. (in Russian).
37. Materials of the ecological and economic justification for the creation of a natural landscape reserve of regional significance “Ingamakitskiy”. Chita: FGBUN IPREK SO RAN, 2019. 104 p. (in Russian).
38. Pigareva N.N., Korsunov V.M. Agrochemistry of soils in the cryolithozone of Transbaikalia. Ulan-Ude: Izdatelstvo BNTs SO RAN, 2004. 204 p. (in Russian).
39. Krasnoshchekov Yu.N. Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in Baikal Region // *Pochvovedenie.* 2018. No. 4. P. 387–401 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X18040019
40. Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L. Pyrogenic change in the microelement content in soil and plants in the pine forests of Western Transbaikalia // *Contemporary Problems of Ecology.* 2013. No. 5. P. 661–674 (in Russian).

Возможные пути применения консортивных связей нового штамма *Trichoderma atroviride* с азотфиксаторами в агробιοтехнологии

© 2025. П. А. Стариков¹, аспирант, Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, А. И. Фокина³, к. б. н., доцент, А. С. Олькова³, д. б. н., доцент, Г. Р. Ахмедов¹, магистрант, П. Д. Степанов¹, магистрант, А. Р. Киреева³, магистрант,

¹Вятский государственный агротехнологический университет, 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: ya.starikov-pavel@yandex.ru, annushka-fokina@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Выделено 26 штаммов грибов рода *Trichoderma* из образцов дерново-подзолистой почвы, коры хвойных и лиственных деревьев, разлагающейся древесины, плодовых тел базидиомицетов. Антагонистическую активность этих штаммов изучали, используя образцы фитопатогенных грибов *Alternaria alternata*, *Aureobasidium pullulans*, *Sclerotinia sclerotiorum*, а также 8 штаммов р. *Fusarium*. Наибольшую антифунгальную активность из исследованных штаммов р. *Trichoderma* проявили 2 изолята (К-01П и К-02Т). Секвенированием участка генома ITS1-5.8S-ITS2 установили принадлежность этих штаммов к видам *T. atroviride* и *T. koningii*. Для дальнейших исследований отобрали штамм *T. atroviride* К-01П на основании его более высокой степени конидиогенеза, целлюлазной активности и широкого спектра антифунгального действия в сравнении с *T. koningii* К-02Т. Отобранный изолят К-01П проявил антагонистическую активность в отношении микромицетов рр. *Fusarium*, *Aureobasidium*, *Alternaria*. Дополнительные лабораторные исследования показали, что штамм *Trichoderma atroviride* оказался совместимым с бактериями-азотфиксаторами *Azotobacter chroococcum*, *Rhizobium trifolii* и *Fischerella muscicola*. Доказан синергизм их действия и фитостимулирующие свойства при инокуляции семян высших растений данными микробными ассоциациями. Выявлен консорциум штаммов *T. atroviride* + *A. chroococcum*, обладающий не только ростстимулирующими свойствами, но и способностью к разложению целлюлозы и растворению фосфатов на более высоком уровне, чем монокультура триходермы. У суспензии штамма К-01П с рекомендованным титром внесения $2 \cdot 10^5$ КОЕ/г показано отсутствие острой токсичности в биотестах на препарате «Эколюм» на основе *Escherichia coli* и ракообразных *Daphnia magna*.

Ключевые слова: *Trichoderma*, антагонизм, фитостимуляция, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Fischerella*, целлюлазная активность, фосфатмобилизация, биотестирование.

Possible ways of using consortium relations of *Trichoderma atroviride* new strain with nitrogen fixers in agrobiotechnology

© 2025. P. A. Starikov¹ ORCID: 0000-0002-3205-6696^{*}

L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337^{*}, A. I. Fokina³ ORCID: 0000-0001-8265-8882^{*}

A. S. Olkova³ ORCID: 0000-0002-5798-8211^{*}, G. R. Akhmedov¹ ORCID: 0009-0006-1418-3014^{*}

P. D. Stepanov¹ ORCID: 0009-0003-4768-3777^{*}, A. R. Kireeva³ ORCID: 0000-0004-5371-3933^{*}

¹Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: ya.starikov-pavel@yandex.ru, annushka-fokina@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Twenty-six strains of *Trichoderma* fungi were isolated from samples of sod-podzolic soil, bark of coniferous and deciduous trees, decaying wood, and sporocarps of basidiomycetes. The antagonistic activity of these strains was studied using samples of phytopathogenic fungi *Alternaria alternata*, *Aureobasidium pullulans*, *Sclerotinia sclerotiorum*, as well as 8 strains of *Fusarium*. Two isolates (K-01P and K-02T) of the studied *Trichoderma* strains showed the highest antifungal activity. Sequencing of the ITS1-5.8S-ITS2 genome region determined that these strains belong to *T. atroviride* and *T. koningii*. *T. atroviride* strain K-01P was selected for further studies. It showed higher degree of conidiogenesis, cellulase activity, and broad spectrum of antifungal action compared to *T. koningii* K-02T. The selected isolate K-01P showed a broad spectrum of antagonistic activity against micromycetes of *Fusarium*, *Aureobasidium*, *Alternaria* genera. Additional laboratory studies showed that the *T. atroviride* strain was compatible with nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter chroococcum*, *Rhizobium trifolii*, and *Fischerella muscicola*. Synergism of their action and phytostimulating properties during inoculation of higher plant seeds with these associations were proved. A consortium of *T. atroviride* + *Azotobacter chroococcum*, strains was identified to have not only has growth-stimulating properties, but also the ability to degrade cellulose and dissolve phosphates at a higher level than the *Trichoderma* monoculture. The suspension of strain K-01P with the recommended titer of $2 \cdot 10^5$ conidia/g showed no acute toxicity in biotests using the "Ecolum" preparation based on *Escherichia coli* and crustaceans *Daphnia magna*.

Keywords: *Trichoderma*, antagonism, phytostimulation, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Fischerella*, cellulase activity, phosphate mobilization, bioassay.

Среди агентов для создания биологических препаратов можно выделить грибы рода *Trichoderma*. Эти микромицеты обладают ярко выраженной способностью конкурировать с другими микроорганизмами за субстрат, продуцировать метаболиты широкого спектра активности, в том числе, фитостимулирующего и антимикробного действия [1–3].

В последние годы всё большее значение приобретает использование в земледелии микробных консорциумов, в том числе, на основе триходермы. Грамотно подобранные ассоциации микроорганизмов, помимо мощных биоконтрольных свойств, стимулируют рост сельскохозяйственных культур, увеличивают их урожайность, повышают супрессивность почвы, демонстрируя комплексное воздействие на агробиоценозы [4].

В частности, в качестве потенциальных партнёров триходермы рассматриваются многочисленные группы бактерий, способные к азотфиксации. Так, положительный эффект в виде стимуляции роста и иммунитета растений наблюдался при изучении ассоциаций *Trichoderma* spp. с *Azotobacter chroococcum*, *Anabaena* sp., *Bradyrhizobium* sp., *Rhizobium leguminosarum* и др. [5–8]. Однако в настоящее время на рынке представлен довольно скромный ассортимент биопрепаратов на основе триходермы и ассоциированных азотфиксаторов.

подавляющее большинство сообщений об использовании триходермы в сочетании с различными азотфиксаторами приводится авторами, проводившими полевые опыты в тропической и субтропической зонах [3, 6, 7]. В то же время, в ряде отечественных публикаций приводятся сведения о положительном влиянии ассоциативного биопрепарата Геостим на растения нута, озимой пшеницы и подсолнечника, а также при обработке

пожнивных остатков злаков [9, 10]. В исследованиях на территории Республики Беларусь показан положительный эффект микробной композиции на основе *Azospirillum brasilense* и *Trichoderma longibrachiatum* при возделывании злаковых культур [11, 12].

Использование биоудобрений на основе консорциумов триходермы и диязотрофов (pp. *Azotobacter*, *Rhizobium*) приводит к наибольшему положительному воздействию на биологическую активность и фитосанитарное состояние почв. Отмечается, что использование азотфиксирующих микроорганизмов совместно с целлюлозолитическими грибами увеличивает скорость биодеградации соломы [13].

Следовательно, целесообразным является дальнейший поиск эффективных ассоциаций грибов рода *Trichoderma* и азотфиксаторов с целью последующего их использования в системе земледелия умеренной климатической зоны.

Цель исследования: изучение потенциала агробиотехнологического применения монокультур *Trichoderma* spp. и бактерий-азотфиксаторов, а также их ассоциаций.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись 26 природных изолятов микромицетов рода *Trichoderma*, выделенных из образцов дерново-подзолистой почвы, древесины и с поверхности плодовых тел базидиальных грибов. В качестве тест-объектов для оценки антагонистической активности триходермы использовали чистые культуры грибных фитопатогенов, часть из которых получена из лаборатории иммунитета и защиты растений (*Fusarium culmorum* P-3/16, *F. oxysporum*),

а также из лаборатории биотехнологии растений и микроорганизмов (*Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum*, *Alternaria alternata*, *Aureobasidium pullulans*) Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого. Штамм *Fusarium equiseti* получен от миколога-любителя С. А. Солодовника. Остальные культуры фитопатогенов, а именно *Sclerotinia sclerotiorum* (с луковицы лука репчатого), *Fusarium* sp. К-1 (с клубня картофеля), *Fusarium* sp. Ч-23 (с луковицы чеснока озимого) и *Fusarium* sp. Т-21 (с листа туи западной) выделены в рамках исследования. Идентификацию микромицетов до рода провели на основании микроскопии [14]. Генетическую идентификацию наиболее перспективных штаммов рода *Trichoderma* провели с помощью секвенирования участка генома ITS1-5.8S-ITS2 рРНК в компании ООО «Синтол» (Россия, г. Москва).

Антифунгальные свойства изолятов триходермы исследовали методом встречных культур на стандартной среде Чапека, оценивая наличие гиперпаразитических свойств у исследуемых штаммов [15]. Степень подавления мицелиального роста колоний фитопатогенов в присутствии *Trichoderma* spp. определяли на 14 сутки роста по формуле:

$$I = \frac{X - Y}{X} \cdot 100, \quad (1)$$

где I – показатель ингибирования, %; X – радиус колонии тест-культуры в контроле, мм; Y – радиус колонии фитопатогена в присутствии антагониста, мм.

Для конструирования микробных ассоциаций использовали цианобактерию *Fischerella muscicola*, а также гетеротрофные виды *Rhizobium trifolii*, *Azotobacter chroococcum*. Штаммы фишереллы и ризобиума взяты из коллекции микроорганизмов кафедры агробиотехнологии, ландшафтной архитектуры и пищевых производств Вятского ГАТУ. Изолят *Azotobacter chroococcum* выделен из ризосферы яровой пшеницы.

Установление типа взаимоотношений грибов рода *Trichoderma* с потенциальными бактериями-партнёрами осуществили на картофельно-глюкозном агаре с использованием методов штрихов, диффузии в агар [19].

Фитостимулирующие свойства исследуемых штаммов и их консорциумов при выращивании растений оценивали на культурах горчицы белой (*Sinapis alba* L.), пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) сорта Баженка (авторы: Ведерников Ю.Е., Коряковцева Л.А.,

Волкова Л.В., Харина А.В.) и клевера паннонского (*Trifolium pannonicum* L.) сорта Снежок (авторы: Грипась М.Н., Арзамасова Е.Г., Попова Е.В.) селекции ФАНЦ Северо-Востока.

Для получения микробных инокулянтов проводили культивирование триходермы на плотной среде Чапека, ризобий – на бобовом агаре, азотобактера – на среде Эшби, фишереллы – на жидкой среде Громова №6 без азота. Суспензии *Trichoderma atroviride* ($1,5 \cdot 10^7$ конидий/мл), *Rh. trifolii* ($5 \cdot 10^8$ КОЕ/мл), *A. chroococcum* ($5 \cdot 10^8$ КОЕ/мл) готовили путём смыва клеток стерильной дистиллированной водой с поверхности плотной среды. Перед микробной обработкой семян культуру *F. muscicola* (титр $1 \cdot 10^7$ клеток/мл) гомогенизировали на малом гомогенизаторе MPW-302 (Польша) в течение 3 мин, режим скорости – 9000 об./мин.

Титры суспензий триходермы и фишереллы определяли с помощью камеры Горяева, суспензии *A. chroococcum* и *Rh. trifolii* готовили в соответствии с отраслевым стандартным образцом мутности бактериальных взвесей серии S-2/5-010719. Рабочую суспензию эталонного биопрепарата Трихоцин СП готовили в соответствии с инструкцией производителя (расход рабочей суспензии – 10 л/т семян). В вариантах с комбинированными инокулянтами смешивали суспензии в равных объёмных соотношениях. Свежеприготовленными суспензиями инокулировали семена. В каждой повторности высевали по 20 семян. Контролем служила дистиллированная вода. Проращивали семена в темноте при температуре 22 ± 1 °С в течение 6 суток, имитируя условия прорастания семян до появления всходов.

При снятии опыта определяли всхожесть, длину корней и высоту стебля, соотношение длин корня и побега и вычисляли индекс роста по формуле:

$$I = (R + P) \cdot D, \quad (2)$$

где I – индекс роста, R – среднее значение длины корней, мм, P – среднее значение высоты проростков, мм, D – доля проросших семян, %.

Сравнивали целлюлазную активность штамма-антагониста К-01П и других штаммов триходермы из коллекции. Использовали два метода определения целлюлозолитической активности культур: качественный метод визуального определения роста грибов на фильтровальной бумаге по Билай и тестирование с Конго красным на среде Гетчинсона с 1%

карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) ($t=22\pm 1^\circ\text{C}$). Для исследования целлюлазной активности по методу Билай посев грибов проводили по 10^7 конидий на пробирку на полоски фильтровальной бумаги, погружённые одним концом в жидкую минеральную среду Чапека. По истечении 10 сут визуально отмечали деградацию субстрата по шкале [17]. При культивировании на среде с КМЦ опыт снимали спустя 4 сут с момента посева согласно методике [18]. Сравнительную оценку целлюлазной активности изучаемых изолятов проводили на основе сравнения индекса разложения КМЦ, который вычисляли по формуле:

$$I_p = \frac{D_{св}}{D_{кол}}, \quad (3)$$

где I_p – индекс разложения КМЦ; $D_{св}$ – диаметр обесцвеченной зоны, мм; $D_{кол}$ – диаметр колонии исследуемого штамма, мм.

Для количественной оценки целлюлазной активности *T. atroviride* и его консорциума с азотобактером в колбы разлили по 100 мл среды Гетчинсона (с азотом и без азота), pH $5,0\pm 0,1$. В качестве энергетического материала вносили в колбы складчатые бумажные фильтры конусом кверху, высота фильтра 2/3 от высоты колбы. Культивировали в течение 21 сут при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$, после чего определяли убыль массы бумажного фильтра в процентах.

Для оценки фосфатмобилизующей активности *T. atroviride* и его консорциума с *A. chroococcum* в колбы разлили по 100 мл среды NBRIP (с азотом и без азота), pH $7,6\pm 0,1$ [19]. Культивировали в течение 11 сут при температуре $22\pm 1^\circ\text{C}$, после чего измеряли pH, определяли концентрацию белка по методу Лоури. Концентрацию подвижного фосфора в культуральной жидкости оценивали по РД 52.24.382-2006.

При исследовании целлюлазной и фосфатсольюбилизирующей активности вносили суспензии микроорганизмов следующего титра: *Trichoderma* sp. К-01П – $4 \cdot 10^7$ конидий, азотобактер – $5 \cdot 10^9$ клеток на 100 мл среды.

Экотоксикологическую оценку инокулянта *Trichoderma* sp. К-01П с титром 10^7 (рабочая концентрация препарата для инокуляции семян) и $2 \cdot 10^5$ (титр внесения в почву) конидий/мл проводили, оценивая биолюминесценцию бактериального препарата «Эколюм» на основе *Escherichia coli* за 30 мин экспозиции согласно ПНД ФТ 14.1:2:3:4.11-04 и смертность *Daphnia magna* за 96 ч по ФР 1.39.2007.03222.

Все опыты проводили как минимум в трёх повторностях. Математическую обработку полученных данных произвели в программах Microsoft Excel и AGROS207. В таблицах и диаграммах указывали средние значения показателей с их стандартными отклонениями.

Результаты и обсуждение

Скрининг антифунгальной активности микромицетов р. *Trichoderma*. Из 26 природных изолятов рода *Trichoderma*, выделенных из различных источников, отобрали 2 штамма на основе их высокой антифунгальной активности в отношении *Fusarium culmorum* р/з-16. Секвенированием участка генома ITS1-5.8S-ITS2 установили принадлежность этих изолятов к видам *T. atroviride* и *T. koningii* (рис. 1, см. цв. вкладку II). При исследовании методом диффузии в агар антифузариозное действие показал лишь 1 штамм – *T. koningii* К-02Т, выделенный с плодового тела трутовика [20]. Этот изолят образовывал зоны лизиса диаметром 13 ± 1 мм на газоне фузариума (рис. 2, см. цв. вкладку II). Предположительно, такой эффект связан с продукцией литических ферментов данным штаммом. В литературе приводятся сведения о высокой продукции активных хитиназ представителями вида *T. koningii* [21].

По результатам скрининга методом встречных культур у почвенного изолята *T. atroviride* К-01П выявили сильные гиперпаразитические свойства в отношении *F. culmorum* Р/з-16: спороношение антагониста занимало более 75% площади колонии фитопатогена на 14 сут. Изолят К-02Т также продемонстрировал способность тормозить рост *F. culmorum*, но в гораздо меньшей степени проявил гиперпаразитические свойства (рис. 3, см. цв. вкладку II).

Для двух штаммов, отобранных по результатам скрининга, методом встречных культур определили способность к антагонизму в отношении различных видов фитопатогенных микромицетов. Так, штамм К-02Т показал гиперпаразитическую активность к *Aureobasidium pullulans* (патоген льна), полностью нарастая на его колонию, и к *Alternaria alternata* (патоген злаковых), на 14 сут покрывая спороношением 70% площади, занятой фитопатогеном (рис. 4, см. цв. вкладку III). Изолят К-01П оказался паразитически активен по отношению к *A. alternata*, *A. pullulans*, к патогенам картофеля *Fusarium* sp. К-1 и *F. equiseti*, а также к *Fusarium* sp. Т-21. Широкий спектр действия

П. А. Стариков, Л. И. Домрачева, А. И. Фокина, А. С. Олькова,
Г. Р. Ахмедов, П. Д. Степанов, А. Р. Киреева «Возможные пути
применения консортивных связей нового штамма *Trichoderma*
atroviride с азотфиксаторами в агробiotехнологии». С. 140.

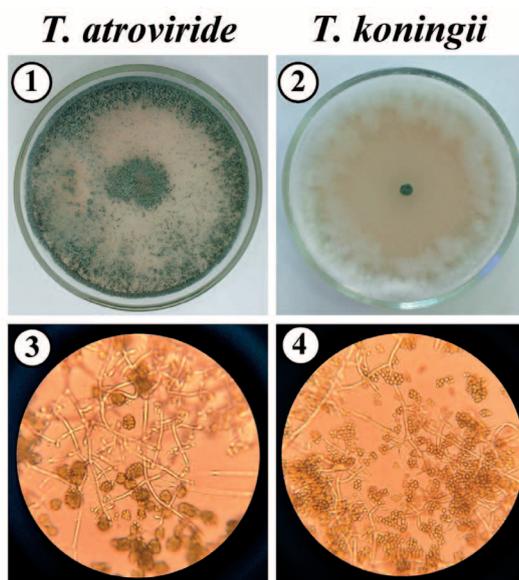


Рис. 1. Колонии на картофельно-глюкозном агаре *Trichoderma* spp. (1, 2) и микроскопия ($\times 1000$) (3, 4): *T. atroviride* К-01П (1, 3); *T. koningii* К-02Т (2, 4) / **Fig. 1.** Colonies on potato-glucose agar (1, 2) and *Trichoderma* spp. microscopy ($\times 1000$) (3, 4): *T. atroviride* К-01P (1, 3); *T. koningii* К-02Т (2, 4)

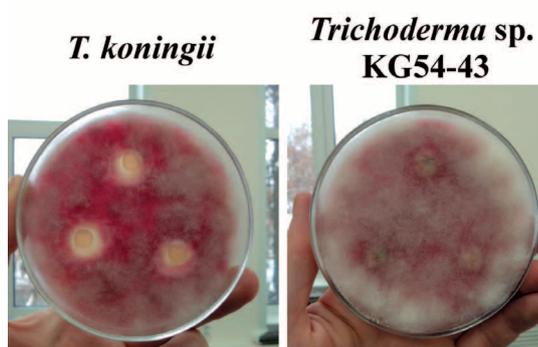


Рис. 2. Результаты скрининга антифузариозной активности *Trichoderma* spp. в отношении *F. culmorum* методом диффузии в агар. *Примечание:* справа – штамм, не показавший антагонистических свойств / **Fig. 2.** Results of a study of the antifusarium activity of *Trichoderma* spp. against *F. culmorum* by diffusion into agar. *Note:* on the right is a strain that did not show antagonistic properties

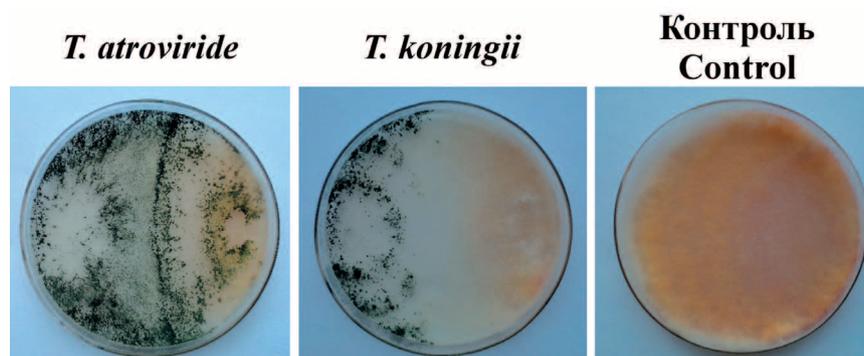


Рис. 3. Результаты скрининга антифузариозной активности методом встречных культур в отношении *F. culmorum* / **Fig. 3.** Results of screening of antifusarium activity by counter-culture method against *F. culmorum*

П. А. Стариков, Л. И. Домрачева, А. И. Фокина, А. С. Олькова, Г. Р. Ахмедов, П. Д. Степанов, А. Р. Киреева «Возможные пути применения консортивных связей нового штамма *Trichoderma atroviride* с азотфиксаторами в агробiotехнологии». С. 140.

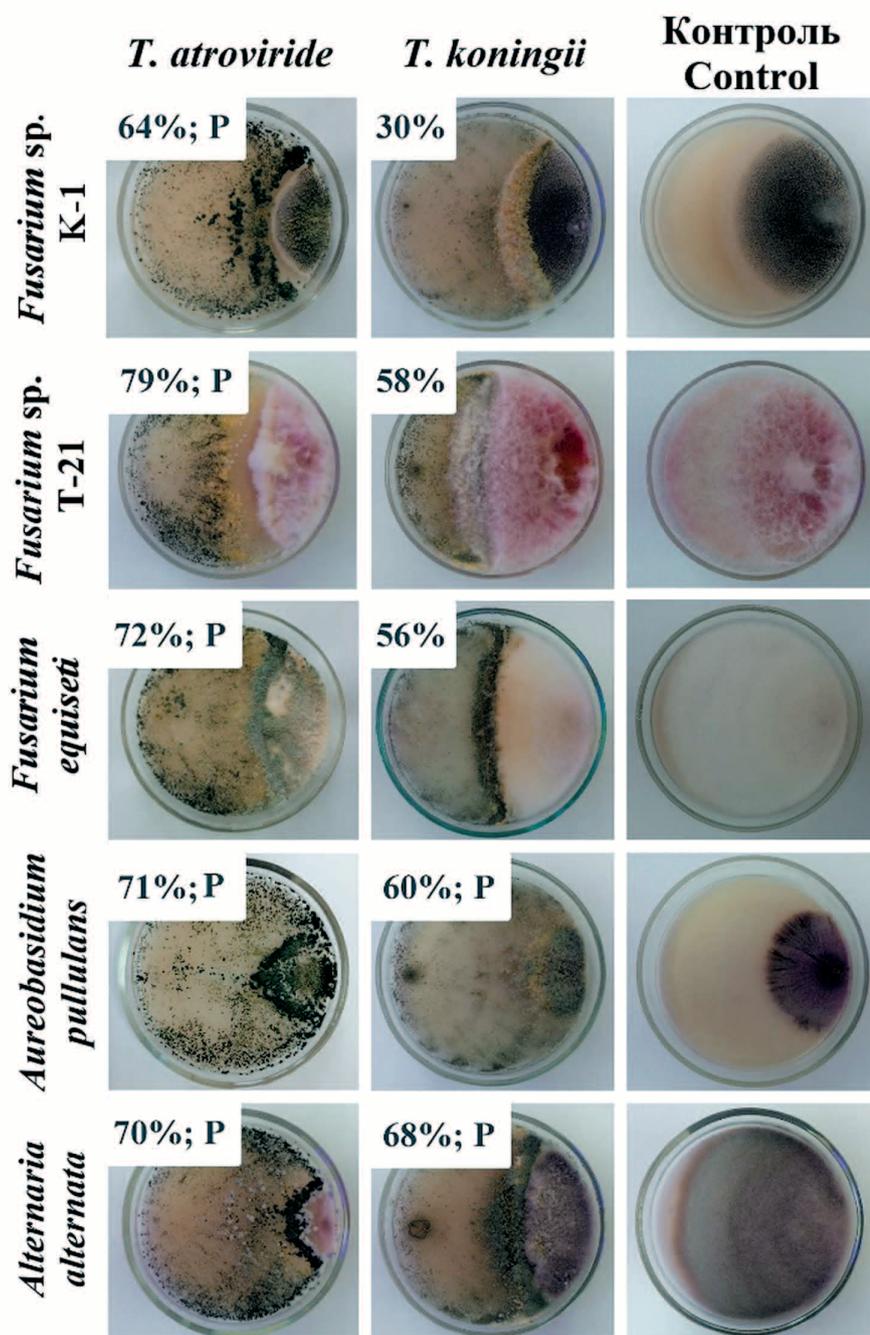


Рис. 4. Антагонистическая активность *T. atroviride* К-01П и *T. koningii* К-02Т в отношении фитопатогенных микромицетов после 14 суток совместного культивирования. В процентах указана степень ингибирования роста тест-культур, P – наличие гиперпаразитизма / Fig. 4. Antagonistic activity of *T. atroviride* K-01P and *T. koningii* K-02T against phytopathogenic micromycetes after 14 days of co-cultivation. Percentages indicate the degree of growth inhibition of the test cultures, P – presence of hyperparasitism

П. А. Стариков, Л. И. Домрачева, А. И. Фокина, А. С. Олькова, Г. Р. Ахмедов, П. Д. Степанов, А. Р. Киреева «Возможные пути применения консортивных связей нового штамма *Trichoderma atroviride* с азотфиксаторами в агробиотехнологии». С. 140.

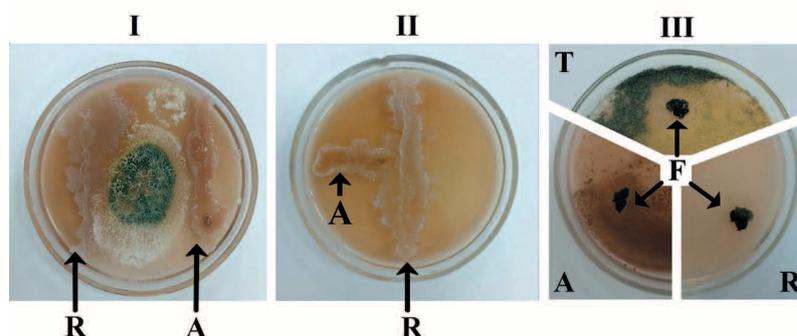


Рис. 5. I – Рост *T. atroviride* в присутствии *Rh. trifolii* и *A. chroococcum*, посеянных методом штрихов, 7 суток. II – Совместный рост *Rh. trifolii* и *A. chroococcum*, 7 суток. III – Рост газонов *T. atroviride*, *Rh. trifolii* и *A. chroococcum* в присутствии биоплёнок *F. muscicola*, 7 суток. T – *T. atroviride*, R – *Rh. trifolii*, A – *A. chroococcum*, F – *F. muscicola* / **Fig. 5.** I – Growth of *T. atroviride* in the presence of *Rh. trifolii* and *A. chroococcum*, seeded by the streak method, 7 days. II – Co-growth of *Rh. trifolii* and *A. chroococcum*, 7 days. III – Growth of lawns of *T. atroviride*, *Rh. trifolii* and *A. chroococcum* in the presence of *F. muscicola* biofilms, 7 days. T – *T. atroviride*, R – *Rh. trifolii*, A – *A. chroococcum*, F – *F. muscicola*

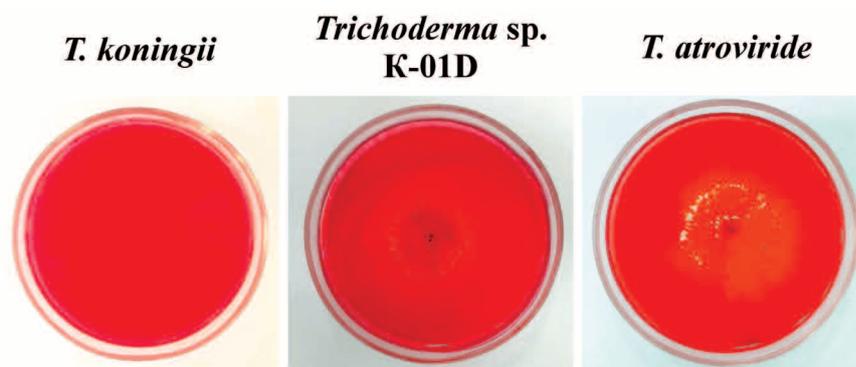


Рис. 7. Карбоксиметилцеллюлазная активность *Trichoderma* spp. на 4 сут культивирования / **Fig. 7.** Carboxymethyl cellulase activity of *Trichoderma* spp. on the 4th day of cultivation

и высокая гиперпаразитическая активность говорят о перспективности использования штамма *T. atroviride* К-01П в дальнейших исследованиях.

In vitro совместимость *T. atroviride* и азотфиксаторов. При совместном культивировании методом штрихов и методом диффузии в агар обнаружили, что *Trichoderma atroviride* не угнетается штаммами бактерий-азотфиксаторов (рис. 5, см. цв. вкладку IV). Об отсутствии антифунгального действия бактерий на триходерму судили по неспособности диазотрофов ограничивать рост штамма путём образования стерильных зон. В свою очередь, в условиях *in vitro* бактерии-дiazотрофы не проявили антагонизма в отношении друг друга.

Фитостимулирующие свойства триходермы и диазотрофов. В следующей серии опытов изучали влияние монокультур *T. atroviride* и азотфиксаторов, а также их консорциумов на растения разных семейств – злаковых (Gramineae), бобовых (Fabaceae) и капустных (Brassicaceae) культур. В опыте отмечены следующие показатели лабораторной всхожести: у горчицы – от 83,3 до 93,3%, пшеницы – от 91,7 до 98,3%, клевера – от 85,0 до 96,7%. До-

стоверных различий по показателю всхожести в вариантах опыта не выявлено. В то же время морфометрические показатели и индекс роста в вариантах опыта различаются. Так, у горчицы стимуляция роста выявлена при инокуляции во всех вариантах опыта (включая обработку ассоциацией *Trichoderma + Azotobacter*), за исключением вариантов с консорциумами триходермы и цианобактериального штамма (табл. 1, рис. 6). Максимальное увеличение длины корня (+27,6%) и индекса роста (+33,2%) наблюдалось при инокуляции семян горчицы монокультурой *F. muscicola*. Инокуляция семян пшеницы азотобактером привела к максимальной достоверной прибавке длины корня относительно эталонного биопрепарата (+13,9%) и контроля (+15,5 %).

По результатам лабораторного опыта клевер паннонский оказался более отзывчивым на инокуляцию семян по сравнению с растениями яровой пшеницы и горчицы белой. Достоверное возрастание индекса роста наблюдалось в 10 вариантах опыта, но наибольшая прибавка показателя на уровне 40,5–43,0% была в случае инокуляции монокультурой азотобактера, смесью *Rhizobium +*

Таблица 1 / Table 1

Влияние микроорганизмов и их консорциумов на индекс роста и соотношение морфометрических показателей проростков горчицы белой и яровой пшеницы
The microorganisms and their consortia effect on the growth index and the ratio of morphometric parameters of *Sinapis alba* and *Triticum aestivum* seedlings

№	Вариант Variant	Индекс роста, усл. ед. Growth index, с. у.	Отношение корень / стебель Root / stem ratio	Индекс роста, усл. ед. Growth index, с. у.	Отношение корень / стебель Root / stem ratio
		Горчица (<i>Sinapis alba</i> L.)		Пшеница (<i>Triticum aestivum</i> L.)	
1	Контроль / Control	9565±684	3,36±0,20	16725±195	1,65±0,07
2	<i>T. atroviride</i>	11533*±473	4,0±0,5	15250±2662	1,61±0,10
3	<i>F. muscicola</i>	12737* ±787	4,26*±0,13	16103±900	1,68±0,02
4	<i>A. chroococcum</i>	12211*±554	3,68±0,37	17892±321	1,81±0,09
5	<i>T. + Az.</i>	11307*±1115	4,30* ±0,16	17642±1146	1,87±0,09
6	<i>Az. + Fis.</i>	11475*±537	3,4±0,5	18164±321	1,83±0,18
7	<i>T. + Fis.</i>	10306±1295	3,99±0,38	12824*±1644	1,72±0,38
8	<i>T. + Az. + Fis.</i>	10758±1035	4,23*±0,37	16958±485	1,75±0,05
9	Эталон / Reference	11466*±275	3,61±0,09	15693±892	1,72±0,01
HCP _{0,95} / LSD _{0,95}		1395,305	0,728	2201,570	нет данных no data

Примечание к таблицам 1 и 2: * – различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$; наибольшие значения показателей обозначены жирным шрифтом. *T.* – *T. atroviride*, *Fis.* – *F. muscicola*, *Az.* – *A. chroococcum*, *Rh.* – *Rh. trifolii*. В качестве эталонного препарата (вариант № 9) выступал трихоцин. HCP_{0,95} – наименьшая существенная разница при 95%-ном уровне вероятности.

Note to Table 1 and 2: * – differences with the control are significant at $p \leq 0.05$; the highest values of the indicators are shown in bold. *T.* – *T. atroviride*, *Fis.* – *F. muscicola*, *Az.* – *A. chroococcum*, *Rh.* – *Rh. Trifolii*. “Trichocin” (variant No. 9) served as a reference biopreparation. LSD_{0,95} – the least significant difference at the 95% probability level.

Таблица 2 / Table 2

Влияние микроорганизмов и их консорциумов на индекс роста и соотношение морфометрических показателей проростков клевера пannonского / The microorganisms and their consortia effect on the growth index and the ratio of morphometric parameters of *Trifolium pannonicum* seedlings

№	Вариант Variant	Индекс роста, усл. ед. Growth index, conventional units	Отношение корень / стебель Root / stem ratio
1	Контроль / Control	3203±729	3,23±0,23
2	<i>T. atroviride</i>	2872±148	3,06±0,02
3	<i>F. muscicola</i>	3776±378	2,70*±0,11
4	<i>A. chroococcum</i>	4579*±609	2,07*±0,33
5	<i>Rh. trifolii</i>	3875*±371	2,13*±0,12
6	<i>T. + Az.</i>	4313*±593	3,09±0,16
7	<i>Az. + Fis.</i>	4398*±205	2,73*±0,19
8	<i>T. + Fis.</i>	3560±662	3,0±0,5
9	<i>T. + Rh.</i>	3700±282	3,05±0,13
10	<i>Rh. + Az.</i>	4571*±295	2,77±0,33
11	<i>Rh. + Fis.</i>	4030*±351	2,72*±0,27
12	<i>T. + Az. + Fis.</i>	4035*±483	2,97±0,38
13	<i>T. + Az. + Rh.</i>	3983*±32	3,77*±0,32
14	<i>Rh. + Az. + Fis.</i>	3932*±539	2,9±0,5
15	<i>T. + Rh. + Fis.</i>	3818±188	3,35±0,30
16	<i>T. + Az. + Fis. + Rh.</i>	4500*±58	3,0±0,4
17	Эталон / Reference	2977±136	2,52*±0,30
НСР _{0,95} / LSD _{0,95}		667,306	0,473

Azotobacter, а также комбинацией *Trichoderma + Azotobacter + Fischerella + Rhizobium*. В случае большинства ассоциативных инокулянтов, содержащих азотобактер, наблюдается усиление ризогенного эффекта, в сравнении с использованием его монокультуры. Максимальная стимуляция роста главного корня клевера зафиксирована в вариантах *Trichoderma + Azotobacter* (+33,7%) и *Trichoderma + Azotobacter + Fischerella + Rhizobium* (+31,1%) (рис. 6).

Наиболее ярко активация роста стебля в длину происходила при обработке клевера монокультурами азотобактера (+86,7%) и ризобиума (+62,7%). В отличие от пшеницы и горчицы, в случае проростков клевера микробная инокуляция вызывала колебания соотношения корень/стебель как в большую, так и в меньшую сторону. Так, в вариантах с инокуляцией *A. chroococcum* и *Rh. trifolii* наблюдалось снижение соотношения корень/стебель более чем в 1,5 раза, что в полевых условиях может приводить к нарушению баланса транспирации и всасывания влаги. Добавление *T. atroviride* sp. K-01П к ризобиуму и азотобактеру приводило к выравниванию соотношения корень/стебель до значений, близких к контролю.

Ферментативная активность монокультуры *T. atroviride* и его консорциума с азотобактером. Штамм-антагонист *T. atroviride* показал достаточно высокую целлюлазную активность при качественном анализе по Билай и культивировании на среде с КМЦ. Его способность разлагать КМЦ сопоставима с активностью штаммов K-01D и K-05D, выделенных с поверхности разлагающейся древесины. При этом штаммы, выделенные со спорокарпов базидиомицетов, включая антагониста *T. koningii*, не обладали выраженными деструкционными свойствами (табл. 3, рис. 7, см. цв. вкладку IV).

При исследовании способности *T. atroviride* разлагать целлюлозу на примере фильтровальной бумаги отмечалось усиление деструкционной активности триходермы в присутствии азотобактера. Наиболее сильное влияние азотобактер оказал на процессы деструкции целлюлозы в безазотистой среде Гетчинсона при учёте убыли массы фильтра (табл. 4). Также определённая достоверная стимуляция разложения целлюлозы наблюдалась при культивировании консорциума на среде, содержащей нитратный азот (+17,8% в сравнении с монокультурой *Trichoderma* sp.).

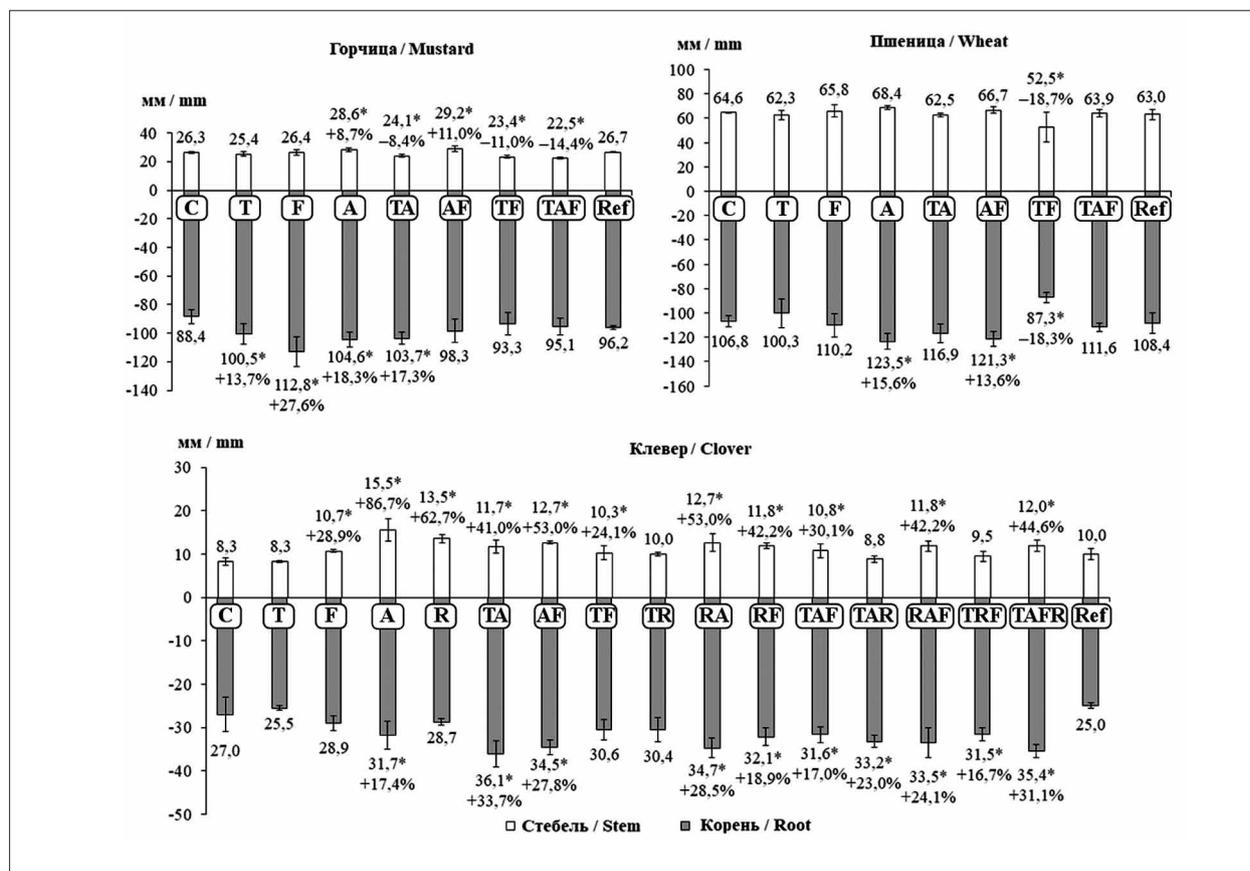


Рис. 6. Линейный рост проростков горчицы белой, пшеницы яровой и клевера паннонского в зависимости от микробной инокуляции: С – контроль, Т – *T. atroviride*, F – *F. muscicola*, А – *A. chroococcum*, R – *Rh. trifolii*, Ref – Трихоцин СП (эталонный биопрепарат).

Примечание: * – различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$. В процентах указана прибавка показателя относительно контрольного значения

Fig. 6. Linear growth of *Sinapis alba*, *Triticum aestivum* and *Trifolium pannonicum* seedlings depending on microbial inoculation: C – control, T – *T. atroviride*, F – *F. muscicola*, A – *A. chroococcum*, R – *Rh. trifolii*, Ref – Trichocin SP (reference biopreparation).

Note: * – differences with the control are significant at $p \leq 0.05$. Percentage indicates the increase of the indicator relative to the control value

Таблица 3 / Table 3

Целлюлазная активность штаммов *Trichoderma* spp.
Cellulase activity of *Trichoderma* spp. strains

Штамм Strain	Источник Source	Диаметр, мм Diameter, mm		Индекс разложения КМЦ СМС decomposition index	Балл спороношения по Билай / Spore formation score according to Bilay
		Колония Colony	Светлая зона Light zone		
		4 сут / 4 day			10 сут / 10 day
<i>T. atroviride</i>	Почва / Soil	74,7±2,5	59,0±1,0	0,79±0,03	++++
<i>T. koningii</i>	Спорокарпы Sporocarps	53,0±1,7	0	0	++
KG54-43		82,0±0	8,3±0,6	0,10±0,01	+
K-01D	Древесина Decaying wood	71,3±3,2	55,0±4,6	0,77±0,04	++++
K-05G		69,0±1,7	59,3±0,6	0,86±0,02	++++

Примечание: КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза; наибольшие значения показателей выделены жирным шрифтом.
Note: СМС – carboxymethylcellulose; the highest values are shown in bold.

Таблица 4 / Table 4

Целлюлазная и фосфатсольбилизирующая активность *T. atroviride* и его консорциума с *A. chroococcum*
Cellulase and phosphate solubilizing activity of *T. atroviride* and its consortium with *A. chroococcum*

Вариант Variant	Деструкция целлюлозы, 21 сут Cellulose destruction, 21 day	Фосфатсольбилизация, 11 сут Phosphate solubilization, 11 day		
		pH	Концентрация в КЖ, мг/мл Concentration in CL, mg/mL	
	Снижение массы фильтра, % Filter weight reduction, %		Белок Protein	Монофосфат-ионы Monophosphate ions
Среда без азота / Medium without nitrogen				
Контроль / Control	0,0	7,58±0,05	н. п. / b. l.	0,039±0,003
<i>T. atroviride</i>	0,0	7,70±0,05	0,072±0,010	0,059±0,003
<i>Tr.</i> + <i>Az.</i>	3,1±0,4	6,76±0,15	0,16±0,05	0,107±0,007
Среда с азотом / Medium with nitrogen				
Контроль / Control	0,0	7,60±0,05	н. п. / b. l.	0,044±0,005
<i>T. atroviride</i>	8,0±1,0	7,51±0,05	0,234±0,026	0,072±0,005
<i>Tr.</i> + <i>Az.</i>	9,4±0,6	6,74±0,25	0,284±0,009	0,123±0,003

Примечание: наибольшие значения показателей выделены жирным шрифтом; КЖ – культуральная жидкость, *Tr.* – триходерма, *Az.* – азотобактер, н. п. – ниже предела обнаружения / Note: the highest values are shown in bold; CL – culture liquid, *Tr.* – *T. atroviride*, *Az.* – *A. chroococcum*, b. l. – below detection limit.

Таблица 5 / Table 5

Результаты биотестирования суспензий *T. atroviride* на препарате «Эколюм»
Results of *T. atroviride* suspensions biotesting by “Ecolum” preparation

Вариант / Variant	Показатель флуоресценции, имп/с Fluorescence index, imp/s	Индекс токсичности Toxicity index
Контроль / Control	1682±370	–
Суспензия 2 · 10 ⁵ кон./мл Suspension 2 · 10 ⁵ con./mL	5163±563	–191±28
Суспензия 10 ⁷ кон./мл Suspension 10 ⁷ con./mL	11789±188	–492±166

Примечание: прочерк обозначает отсутствие значения.
Note: a dash indicates that there is no value.

При исследовании фосфатсольбилизирующей способности отмечено, что растворение фосфатов значительно ускоряется при использовании консорциума *T. atroviride* + *A. chroococcum* в сравнении с монокультурой триходермы (+92,2% в безазотистой среде и +70,8% в среде с NaNO₃) (табл. 4).

Одним из признаков растворения фосфатов служит увеличение кислотности среды. Так, при исследовании фосфатсольбилизирующей способности отмечено, что растворение фосфатов консорциумом штаммов сопровождалось детектируемым снижением pH культуральной жидкости более чем на 0,8 единиц. Также косвенно о наличии фосфатсольбилизирующей активности можно судить по увеличению уровня секреции белка в культуральную жидкость (табл. 3).

Экотоксикологическая оценка суспензий *T. atroviride*. Для дальнейшего внедрения изучаемых микроорганизмов в практику экологически ориентированного сельского хозяйства определяли безопасность их рабочих суспензий методами биотестирования. Суспензии изолята *T. atroviride* с титром 10⁷ кон./мл используемым для обработки семян, и с титром 2 · 10⁵ кон./мл, предназначенным для внесения в почву, не вызывали угнетения биолюминесценции в биотесте с использованием препарата «Эколюм». Напротив, выявлена стимуляция тест-функции, что говорит о положительном влиянии *T. atroviride* на *E. coli*, а также об отсутствии в суспензии триходермы потенциально токсичных веществ (табл. 5).

В биотесте на *D. magna* также показано, что суспензия с титром 2 · 10⁵ кон./мл является

безопасной для особей данного вида. При этом отмечается гибель дафний в тесте при титре конидий 10^7 , который используется для предпосевной инокуляции семян. Вероятно, это связано с механическим воздействием конидий *T. atroviride* на фильтровальный аппарат дафний. Поскольку инокулянт с таким титром предназначен для обработки семян перед посевом в почву, в экосистемах не будет достигаться столь высокая концентрация конидий гриба.

Заключение

Грибы р. *Trichoderma* – излюбленный объект исследования российских и зарубежных учёных, которые проводят многочисленные опыты по изучению их агрономически полезных свойств. В то же время, чрезвычайно актуально использование в сельскохозяйственной практике аборигенных штаммов и их консорциумов, которые приспособлены к агроклиматическим условиям конкретного региона. С этой целью штаммы триходермы выделяли из различных экониш на территории г. Кирова и его окрестностей. Первичный скрининг антифунгальных свойств среди 26 исследованных изолятов выявил штамм *T. atroviride* К-01П с наибольшей активностью в отношении различных фитопатогенов. Этот штамм был отобран для дальнейших исследований, в рамках которых была показана биологическая совместимость и синергизм его действия в ассоциациях с азотфиксирующими бактериями, которые широко используются в современном сельском хозяйстве.

В частности, удалось показать, что консорциум *T. atroviride* + *A. chroococcum* обладает фитостимулирующими свойствами в отношении проростков горчицы белой и клевера паннонского, что отразилось в увеличении индекса роста на 18,2 и 34,7% соответственно. В случае клевера наилучшие ростовые показатели были достигнуты при инокуляции семян ассоциацией *Trichoderma* + *Azotobacter* + *Fischerella* + *Rhizobium* (увеличение индекса роста на 40,5%). В рамках исследования целлюлазной и фосфатсольюбилизирующей способности *T. atroviride* было доказано, что в составе консорциума с азотобактером эта активность значительно возрастает, что особенно ярко проявляется при культивировании штаммов на безазотистых средах. Исследования токсичности *T. atroviride* К-01П в отношении стандартных тест-систем «Эколюм» и *Daphnia magna* показали экологическую безопасность суспензии с титром $2 \cdot 10^5$ кон./мл, предназначенной для внесения в почву.

Таким образом, результаты исследования потенциала использования *T. atroviride* как в монокультуре, так и в консорциумах с бактериями-азотфиксаторами расширяют представления об агрономически ценных свойствах данных микроорганизмов и открывают перспективу создания на их основе биопрепаратов комплексного действия.

Литература

1. Sood M., Kapoor D., Kumar V., Sheteiwiy M.S., Ramakrishnan M., Landi M., Araniti F., Sharma A. *Trichoderma*: The “secrets” of a multitasking biocontrol agent // *Plants*. 2020. V. 9. No. 6. Article No. 762. doi: 10.3390/plants9060762
2. Домрачева Л.И., Стариков П.А., Ковина А.Л., Ашихмина Т.Я. Использование микромицетов рода *Trichoderma* и консорциумов на их основе в агробиотехнологии (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. № 1. С. 6–18. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-006-018
3. Barbosa J.Z., Hungria M., Prior S.A., Moura M.C., Poggere G., Motta A.C.V. Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and *Trichoderma*: a global meta-analysis // *Appl. Soil Ecol.* 2022. V. 176. Article No. 104493. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104493
4. Домрачева Л.И., Ковина А.Л., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я. Цианобактериальные симбиозы и возможность их практического использования (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 3. С. 21–30. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030
5. Neelipally R.T.K.R., Anoruo A.O., Nelson S. Effect of co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Trichoderma* on growth, development, and yield of *Arachis hypogaea* L. (peanut) // *Agronomy*. 2020. V. 10. No. 9. Article No. 1415. doi: 10.3390/agronomy10091415
6. Velmourougane K., Prasanna R., Chawla G., Nain L., Kumar A., Saxena A.K. *Trichoderma*–*Azotobacter* biofilm inoculation improves soil nutrient availability and plant growth in wheat and cotton // *J. Basic Microbiol.* 2019. V. 59. No. 6. P. 632–644. doi: 10.1002/jobm.201900009
7. Prasanna R., Kanchan A., Ramakrishnan B., Ranjan K., Venkatachalam S., Venkatachalam S., Hossain F., Shivay Y.S., Krishnan P., Nain L. Cyanobacteria-based bioinoculants influence growth and yields by modulating the microbial communities favourably in the rhizospheres of maize hybrids // *Eur. J. Soil Biol.* 2016. V. 75. P. 15–23. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.001
8. Saber W.I.A., Abd El-Hai K.M., Ghoneem K.M. Synergistic effect of *Trichoderma* and *Rhizobium* on both biocontrol of chocolate spot disease and induction of nodulation, physiological activities and productivity of *Vicia faba* // *Res. J. Microbiol.* 2009. V. 4. No. 8. P. 286–300. doi: 10.3923/jm.2009.286.300
9. Авдеенко А.П., Черненко В.В., Горячев В.П., Горячева С.А. Эффективность применения биологических

фунгицидов на озимой пшенице // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2014. № 7 [Электронный ресурс] <https://agro.snauka.ru/2014/07/1523> (Дата обращения: 22.01.2025).

10. Беляков А.М., Тубалов А.А. Эффективность применения препарата «Геостим» при возделывании озимой пшеницы в условиях Волгоградской области // Экологические аспекты использования земель в современных экономических формациях: Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2017. С. 399–405.

11. Михайловская Н.А., Войтка Д.В., Юхновец А.В., Барашенко Т.Б., Дюсова С.В. Сравнительная эффективность раздельного и совместного применения *A. brasilense*, *B. circulans* и *T. longibrachiatum* на посевах тритикале озимого на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах // Почвоведение и агрохимия. 2021. № 1. С. 129–138.

12. Михайловская Н.А., Войтка Д.В., Юзефович Е.К., Барашенко Т.Б. Действие трёхкомпонентного микробного инокулянта на урожайность ржи озимой и ячменя ярового // Рациональное использование природных ресурсов в агроценозах: материалы международной научно-практической конференции. Симферополь: ИТ «Ариал», 2020. С. 31–33. doi: 10.33952/2542-0720-15.05.2020.17

13. Алимova Ф.К. Промышленное применение грибов рода *Trichoderma*. Казань: Казанский государственный университет им. В.И.Ульянова-Ленина, 2006. 209 с.

14. Sutton D.A., Fothergill A.W., Rinaldi M.G. Guide to clinically significant fungi. Baltimore: Williams & Wilkins, 1998. 471 p.

15. Практикум по микробиологии / Под ред. Н.С. Егорова. М.: Московский гос. университет, 1976. 308 с.

16. Нетрусов А.И., Егоров М.А., Захарчук Л.М. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.

17. Методы экспериментальной микологии / Под ред. В.И. Билай. Киев: Наук. думка, 1973. 243 с.

18. Teather R.M., Wood P.J. Use of Congo red-polysaccharide interaction in enumeration and characterization of cellulolytic bacteria from the bovine rumen // Appl. Environ Microbiol. 1982. V. 43. No. 4. P. 777–780. doi: 10.1128/aem.43.4.777-780.1982

19. Aliyat F.Z., Maldani M., El Guilli M., Nassiri L., Ibijbijen J. Phosphate-solubilizing bacteria isolated from phosphate solid sludge and their ability to solubilize three inorganic phosphate forms: calcium, iron, and aluminum phosphates // Microorganisms. 2022. V. 10. No. 5. Article No. 980. doi: 10.3390/microorganisms10050980

20. Стариков П.А., Шешегова Т.К. Скрининг изолятов *Trichoderma* spp., перспективных для биоконтроля *Fusarium culmorum* // Микроорганизмы и плодородие почвы: материалы I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения профессора Е.М. Панкратовой. Киров: Вятский ГАТУ, 2022. С. 128–131.

21. Metcalf D.A., Wilson C.R. The process of antagonism of *Sclerotium cepivorum* in white rot affected onion roots by *Trichoderma koningii* // Plant Pathology. 2001. V. 50. No. 2. P. 249–257. doi: 10.1046/j.1365-3059.2001.00549.x

References

1. Sood M., Kapoor D., Kumar V., Sheteiwiy M.S., Ramakrishnan M., Landi M., Araniti F., Sharma A. *Trichoderma*: The “secrets” of a multitasking biocontrol agent // Plants. 2020. V. 9. No. 6. Article No. 762. doi: 10.3390/plants9060762

2. Domracheva L.I., Starikov P.A., Kovina A.L., Ashikhmina T.Ya. Application of *Trichoderma* micromycetes and trichoderma-based consortia in agrobiotechnology (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 1. P. 6–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-006-018

3. Barbosa J.Z., Hungria M., Prior S.A., Moura M.C., Poggere G., Motta A.C.V. Improving yield and health of legume crops via co-inoculation with rhizobia and *Trichoderma*: a global meta-analysis // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 176. Article No. 104493. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104493

4. Domracheva L.I., Kovina A.L., Kondakova T.V., Ashikhmina T.Ya. Cyanobacterial symbioses and their practical use (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 21–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030

5. Neelipally R.T.K.R., Anoruo A.O., Nelson S. Effect of co-inoculation of *Bradyrhizobium* and *Trichoderma* on growth, development, and yield of *Arachis hypogaea* L. (peanut) // Agronomy. 2020. V. 10. No. 9. Article No. 1415. doi: 10.3390/agronomy10091415

6. Velmourougane K., Prasanna R., Chawla G., Nain L., Kumar A., Saxena A.K. *Trichoderma*–*Azotobacter* biofilm inoculation improves soil nutrient availability and plant growth in wheat and cotton // J. Basic Microbiol. 2019. V. 59. No. 6. P. 632–644. doi: 10.1002/jobm.201900009

7. Prasanna R., Kanchan A., Ramakrishnan B., Ranjan K., Venkatachalam S., Venkatachalam S., Hossain F., Shivay Y.S., Krishnan P., Nain L. Cyanobacteria-based bioinoculants influence growth and yields by modulating the microbial communities favourably in the rhizospheres of maize hybrids // Eur. J. Soil Biol. 2016. V. 75. P. 15–23. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.001

8. Saber W.I.A., Abd El-Hai K.M., Ghoneem K.M. Synergistic effect of *Trichoderma* and *Rhizobium* on both biocontrol of chocolate spot disease and induction of nodulation, physiological activities and productivity of *Vicia faba* // Res. J. Microbiol. 2009. V. 4. No. 8. P. 286–300. doi: 10.3923/jm.2009.286.300

9. Avdeenko A.P., Chernenko V.V., Goryachev V.P., Goryacheva S.A. Efficiency of use of biological fungicides on winter wheat // Agriculture, forestry and water management. 2014. No. 7 (in Russian) [Internet resource] <https://agro.snauka.ru/2014/07/1523> (Accessed: 22.01.2025).

10. Belyakov A.M., Tubalov A.A. Efficiency of using the drug "Geostim" in the cultivation of winter wheat in the Volgograd region // Environmental aspects of land use in modern economic formations: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Volgograd: Volgogradskiy GAU, 2017. P. 399–405 (in Russian).
11. Mikhailovskaya N.A., Voitka D.V., Yukhnovets A.V., Barashenko T.B., Dyusova S.V. Efficiency of separate and combine application of *A. brasilense*, *B. circulans* and *T. longibrachiatum* for the treatment of winter triticale sowing on eroded luvisol sandy loam soils // Soil Science and Agrochemistry. 2021. No. 1. P. 129–138 (in Russian).
12. Mikhailovskaya N.A., Voitka D.V., Yuzefovich E.K., Barashenko T.B. Effect of three-component microbial inoculant on winter rye and spring barley yields // Rational use of natural resources in agrocenoses: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Simferopol, 2020. P. 31–33 (in Russian). doi: 10.33952/2542-0720-15.05.2020.17
13. Alimova F.K. Industrial use of fungi of the genus *Trichoderma*. Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy universitet im. V.I. Ulyanova-Lenina, 2006. 209 p. (in Russian).
14. Sutton D.A., Fothergill A.W., Rinaldi M.G. Guide to clinically significant fungi. Baltimore: Williams & Wilkins, 1998. 471 p.
15. Microbiology Workshop / Ed. N.S. Egorov. Moskva: Moskovskiy gos. universitet, 1976. 308 p. (in Russian).
16. Netrusov A.I., Egorov M.A., Zakharchuk L.M. Microbiology Workshop. Moskva: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).
17. Methods of experimental mycology / Ed. V.I. Bilay. Kiev: Naukova dumka, 1973. 243 p. (in Russian).
18. Teather R.M., Wood P.J. Use of Congo red-poly-saccharide interaction in enumeration and characterization of cellulolytic bacteria from the bovine rumen // Appl. Environ Microbiol. 1982. V. 43. No. 4. P. 777–780. doi: 10.1128/aem.43.4.777-780.1982
19. Aliyat F.Z., Maldani M., El Guilli M., Nassiri L., Ibjibijen J. Phosphate-solubilizing bacteria isolated from phosphate solid sludge and their ability to solubilize three inorganic phosphate forms: calcium, iron, and aluminum phosphates // Microorganisms. 2022. V. 10. No. 5. Article No. 980. doi: 10.3390/microorganisms10050980
20. Starikov P.A., Sheshhegova T.K. Screening of *Trichoderma* spp. isolates promising for biocontrol of *Fusarium culmorum* // Microorganisms and soil fertility: Materialy I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora E.M. Pankratovoj. Kirov: Vyatskiy GATU, 2022. P. 128–131 (in Russian).
21. Metcalf D.A., Wilson C.R. The process of antagonism of *Sclerotium cepivorum* in white rot affected onion roots by *Trichoderma koningii* // Plant Pathology. 2001. V. 50. No. 2. P. 249–257. doi: 10.1046/j.1365-3059.2001.00549.x

Структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных растений томата (*Solanum lycopersicum* L.)

© 2025. А. А. Антонов¹, аспирант, А. А. Ванькова¹, к. б. н., доцент,
Е. Н. Баранова^{1,2,3}, к. б. н., в. н. с., Л. В. Куренина², к. б. н., в. н. с.,

Е. В. Платонова⁴, н. с.,

¹РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева,

127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49,

²ФГБНУ ВНИИСБ,

127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42,

³ГБС им. Н.В. Цицина РАН,

127276, Россия, г. Москва, ул. Ботаническая, д. 4,

⁴ООО «НПП Биосфера»,

119571, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 96,

e-mail: antonov4B@yandex.ru

Выращивание генетически модифицированных растений может быть сопряжено с рисками для окружающей среды, включая почвенные микроорганизмы, которые выполняют важные биосферные функции. В работе использовали трансгенные растения томата (*Solanum lycopersicum* L.) селекционной линии, полученной из сорта Ямал, с геном синтеза холиноксидазы *codA*, кодирующим устойчивость к осмотическому стрессу. Контролем служили нетрансформированные растения той же селекционной линии. После 20 недель выращивания в почвенной культуре проводили ампликонное секвенирование 16S рРНК тотальной ДНК из ризосферы. Анализ таксономического разнообразия и структуры бактериального сообщества ризосферы показал увеличение доли доминантного филума Proteobacteria (с 62 до 64%) и снижение Bacteroidetes (с 19 до 17%) у трансгенных растений по сравнению с контролем. В ризосфере генномодифицированных растений не выявлены классы Spartobacteria и Chloroflexia, присутствующие у контрольных растений, но обнаружены классы Caldilineae и Holophagaе, отсутствующие в ризосфере контрольных растений. Таксономический анализ на родовом уровне выявил у генномодифицированных растений сокращение долевого участия родов *Sphingomonas*, *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris* (на 0,6–1,2%) и увеличение относительного обилия родов *Deviosia* и *Bauldia* (на 1,2–1,3%). В ризосфере трансгенных растений исчезли роды *Sphingobium*, *Pedomicrobium*, присутствующие у контрольных растений, и появились рр. *Micavibrio* и *Chryseolinea*. Индекс разнообразия Шеннона составил 8,62 и 8,77, Чao1 – 1075 и 1122 у контрольных и трансгенных растений соответственно. Таким образом, в ризосфере изученных трансгенных растений выявлены изменения состава и структуры бактериального комплекса, которые могут привести к нарушению функций микробной системы почвы.

Ключевые слова: бактерии, ризосфера, томат, трансгенные растения, холиноксидаза.

Transgenic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) rhizosphere bacterial community structure

© 2025. А. А. Antonov¹ ORCID: 0000-0002-7684-0503, А. А. Vankova¹ ORCID: 0000-0001-5473-9714,†

Е. Н. Baranova^{1,2,3} ORCID: 0000-0001-8169-9228, Л. В. Kurenina² ORCID: 0000-0001-5359-8665,†

Е. В. Platonova⁴ ORCID: 0009-0000-7666-5453,†

¹RSAU-MTAA,

49, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127434,

²ARRIAB,

42, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127550,

³MBG RAS,

4, Botanicheskaya St., Moscow, Russia, 127276,

⁴LLC “NPP Biosfera”,

96, Vernadsky prospect, Moscow, Russia, 119571,

e-mail: antonov4B@yandex.ru

The cultivation of genetically modified plants may involve risks to the environment, including soil microorganisms that perform important biospheric functions. The work used transgenic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) of a breeding line obtained from the Yamal variety, with the *codA* choline oxidase synthesis gene encoding resistance to osmotic stress. Plants of the same breeding line of the original variety used as control. After 20 weeks of cultivation in a soil culture, amplicon sequencing of 16S rRNA of total DNA from the rhizosphere was performed. Analysis of the taxonomic diversity and structure of the bacterial community of the rhizosphere showed an increase in the proportion of the Proteobacteria dominant phylum (from 62 to 64%) and a decrease in Bacteroidetes (from 19 to 17%) in transgenic plants compared with the control. The classes Spartobacteria and Chloroflexia present in control plants were not detected in the rhizosphere of genetically modified plants. Classes Caldilineae and Holophagae absent in the rhizosphere of control plants were detected. Taxonomic analysis at the generic level revealed in genetically modified plants a decrease in the share of the gg *Sphingomonas*, *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris* (by 0.6–1.2%) and an increase in the relative abundance of the gg *Deviosia* and *Bauldia* (by 1.2–1.3%). The gg *Sphingobium* and *Pedomicrobium* present in control plants were undetected in the rhizosphere of transgenic plants, and the gg *Micavibrio* and *Chryseolinea* were found out. The Shannon diversity index was 8.62 and 8.77, Chao1 – 1075 and 1122 in control and transgenic plants, respectively. The revealed changes in the composition and structure of the bacterial complex in the rhizosphere of the studied transgenic plants may lead to disruption of the functions of the soil microbial system.

Keywords: bacteria, rhizosphere, tomato, transgenic plants, choline oxidase.

Обеспечение растущего населения нашей планеты продуктами питания и сырьём для промышленности – главная задача сельского хозяйства. В качестве одного из решений этой сложной проблемы предлагается коммерческое возделывание генетически модифицированных растений. Методы генной инженерии позволяют получать растения с новыми ценными свойствами, такими как высокая урожайность, устойчивость к гербицидам сплошного действия, болезням и вредителям, стрессовым условиям окружающей среды [1–4]. При этом существуют экологические риски для биосферы, оценить которые в настоящее время не представляется возможным вследствие недостаточной изученности проблемы.

Ризосфера – тонкий слой почвы, непосредственно прилегающий к корням растений, формирующийся под действием корневых экссудатов [5, 6]. Корневые экссудаты растений оказывают мощное воздействие на микроорганизмы ризосферы. Колонизация корней и свойства бактерий зависят от генетически обусловленных пропорций определённых компонентов корневых экссудатов. Существует достаточно экспериментальных доказательств того, что в зависимости от состава корневых экзометаболитов меняется структура микробного сообщества в ризосфере [7–13]. Биоразнообразие и функции микробного сообщества в ризосфере трансгенных растений могут претерпевать изменения вследствие селективного стимулирования микроорганизмов, способных утилизировать продукты, синтез которых индуцирован трансформацией [14]. Одним из актуальных вопросов биобезопасности при выращивании трансгенных культур, таких как рапс, картофель, люцерна, является мониторинг и выявление изменений в структуре микробного сообщества в корневой зоне почвы

[15]. Анализ опубликованных результатов исследований по этой теме достаточно противоречив. Так, в некоторых работах авторы не выявили влияния трансгенных растений на микробиом ризосферы [14, 16–18]. Однако, в других – положительный эффект наблюдался [7, 19–22]. Одной из причин неоднозначности полученных результатов является дизайн экспрессионных векторов, используемых для трансформации растений. Состав корневых экссудатов трансгенных растений может существенно измениться, если продукт экспрессии введённого трансгена функционирует в тканях корня растения. Таким образом, результаты исследований на данную тему сильно разнятся или противоречат друг другу. Вопрос о безопасности генетически модифицированных растений остаётся дискуссионным.

Цель работы – изучить воздействие трансгенных растений томата на структуру бактериального сообщества ризосферы для оценки возможного экологического риска для микробного ценоза почвы.

Материалы и методы исследования

Растительный материал. Для проведения исследования использовали растения томата (*Solanum lycopersicum* L.): трансгенные (с геном фермента холиноксидазы (*codA*) из почвенной бактерии *Arthrobacter globiformis*) и нетрансгенные селекционной линии, полученной из сорта Ямал. Семена исходной селекционной линии томата любезно предоставлены Г.Ф. Монахосом на Селекционной станции им. Н.Н. Тимофеева (г. Москва). Трансгенные растения были получены во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной биотехнологии (г. Москва) методом агробактериальной трансформации

[23]. В качестве экспрессионной плазмиды использовали стандартный вектор pVI, содержащий целевой ген *codA* и маркерный ген NPTII. Эти растения были клонально микро-размножены *in vitro* на среде Мурасиге-Скуга [24].

Трансгенные растения и нетрансгенный контроль, также полученный клональным микроразмножением *in vitro*, были пересажены для адаптации в вегетационные сосуды объёмом 300 мл, содержащие смесь торфа и песка 3:1 (рис. 1). Растения постепенно адаптировались к условиям внешней среды, их выращивали в теплице при естественном освещении. После адаптации растения культивировали в сосудах на протяжении 20 недель в торфяной низинной окультуренной почве до начала массового цветения.

Молекулярно-генетический анализ.

Подтверждение трансгенности растительного материала. Геномную ДНК выделяли из листьев томата с помощью набора реагентов «ДНК-Экстра-4» (ЗАО «Синтол», Россия). Для амплификации использовали два праймера: CHL-For (5'-ACAACCTCTCCTGCATCATCATCATCGCCTTCT-3') и CHL-Rev (5'-GCATCAACAGCTTCGGCGTAT-3') (ЗАО «Синтол», Россия). Смесь для амплификации содержала 1 мкл ДНК (20–100 нг); 1 мкл

Taq-полимеразы (5000 единиц/мл); 4 мкл 10× ПЦР буфера с MgCl₂; 1,5 мкл смеси dNTP (2,5 мМ); 0,5 мкл каждого праймера (0,25 мМ) и 13 мкл деионизированной воды (общий объём реакции 20 мкл). Использовали реагенты SibEnzyme (НПО «Сибэнзим», Россия). Амплификацию проводили при следующих условиях: начальная денатурация при 95 °С в течение 2 мин; затем 40 циклов: денатурация при 95 °С – 30 с, отжиг при 60 °С – 45 с, элонгация при 72 °С – 2 мин, финальная элонгация – 72 °С в течение 5 мин. Продукты ПЦР анализировали методом электрофореза в 1,4% агарозном геле с добавлением бромистого этидия. Размер полученных фрагментов ДНК определяли визуально путём сравнения с маркером (100 bp + 1,5 kb) (НПО «Сибэнзим», Россия) [23].

Выделение ДНК из ризосферы и амплификация. При подготовке образцов ризосферы для анализа вегетирующие растения извлекали из сосудов вместе с почвой, крупные комья отделяли от корней. Затем ризосферную почву вручную стряхивали с поверхности корешков, тщательно перемешивали и отбирали среднюю пробу. Геномную ДНК из почвы выделяли с использованием набора FastDNA SPIN Kit for soil (MP Biomedicals, США) в соответствии с рекомендациями производи-

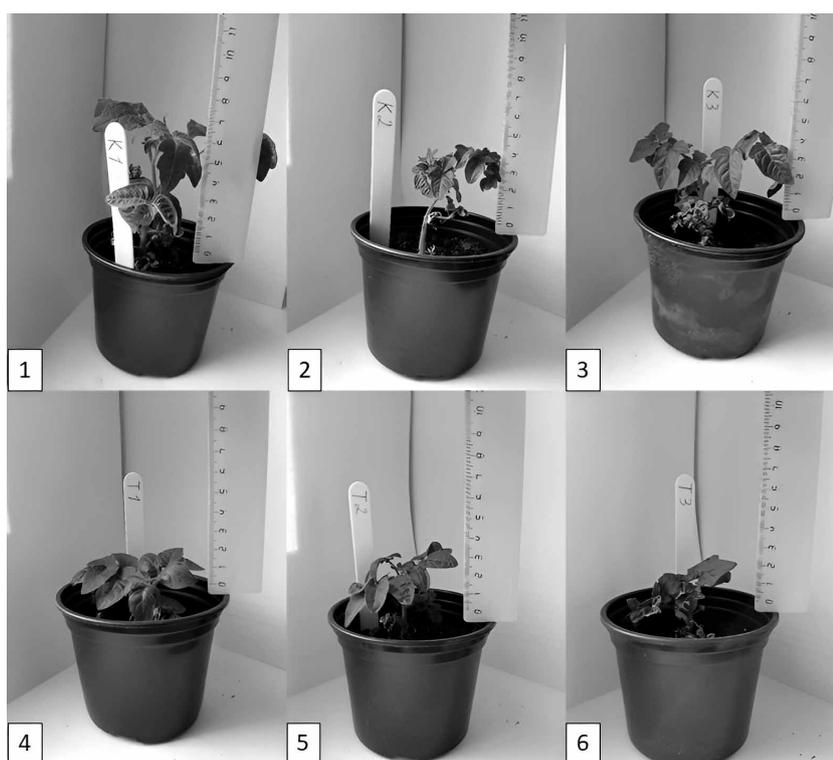


Рис. 1. Контрольные (1–3) и трансгенные (4–6) растения в вегетационных сосудах на 26 сутки культивирования / Fig. 1. Control (1–3) and transgenic (4–6) plants in vegetative pots on the 26th day of cultivation

теля. Для амплификации гипервариабельного V3–V4 участка гена 16S рибосомальной РНК использовали смесь праймеров GPro341F (5'-CCTACGGGNBGCASCAG-3') и GPro806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAATCC-3') концентрацией 0,625 мкМ каждого. Амплификацию проводили в объёме 25 мкл в смеси, содержащей 5× KTN-mix (Eurogen) 5 мкл, смесь праймеров 2 мкл, 50× SYBR (ЗАО «Евроген», Россия) 0,5 мкл, в амплификаторе в реальном времени CFX96 Touch (Bio-Rad, США) при следующих условиях: начальная денатурация 3 мин при 95 °С; 35 циклов: денатурация 30 с при 95 °С, отжиг 30 с при 57 °С, элонгация 30 с при 72 °С; финальная элонгация 5 мин при 72 °С.

Синтез библиотек для секвенирования.

Амплификацию ПЦР продукта, полученного на первом этапе, с целью индексирования библиотек проводили в объёме 25 мкл в смеси, содержащей 5× KTN-mix (ЗАО «Евроген», Россия) 5 мкл, смесь праймеров 2 мкл, 50× SYBR (ЗАО «Евроген», Россия) 0,5 мкл, в амплификаторе в реальном времени CFX96 Touch (Bio-Rad, США) при следующих условиях: первичная денатурация 3 мин при 95 °С; 7 циклов: денатурация 30 с при 95 °С, отжиг 30 с при 55 °С, элонгация 30 с при 72 °С; заключительная элонгация 5 мин при 72 °С. Для амплификации использовали индексы, рекомендованные производителем: Nextera Index Kit (Illumina, США).

Секвенирование на платформе Illumina.

Ампликоны после второго этапа очищались с использованием магнитных частиц AMPure XP (КАРАBiosystems, США). Анализ библиотек проводился на секвенаторе Illumina MiSeq (Illumina, США) методом парно-концевого чтения генерацией не менее 10 000 парных прочтений на каждый образец с использованием следующих реактивов: MiSeq Reagent Kit v2 nano и MiSeq v2 Reagent Kit (500 Cycles PE) (Illumina, США).

Обработка данных. Полученные данные ампликонного секвенирования обрабатывались по алгоритму QIIME 1.9.1. Использован алгоритм классификации операционных таксономических единиц (ОТЕ) с открытым референсом (Open-reference OTU), порог классификации 97%. Для таксономической идентификации последовательностей использовались базы данных Silva версии 132 и Unite v8.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований в ризосфере контрольных растений выявлено

948 таксономических операционных единиц (ОТУ), у генетически модифицированных растений – 1017 OTU. Индекс Шеннона составил 8,62 и 8,77; Чao1 – 1075 и 1122 у контрольных и трансгенных растений соответственно. Количество выявленных OTU и индексы разнообразия показывают большее богатство видов в ризосфере трансгенных растений по сравнению с контрольными. Как видно на диаграмме (рис. 2), таксономическая структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных и контрольных растений на уровне филумов довольно схожа. В микробиомах изученных растений были выявлены следующие филумы: Proteobacteria (62,1 и 64,2%), Bacteroidetes (19,0 и 17,2%), Verrucomicrobia (4,6 и 4,2%), Actinobacteria (3,2 и 4,0%), Acidobacteria (2,6 и 2,4%), Chloroflexi (2,0 и 1,4%), Gemmatimonadetes (1,6 и 1,7%), Saccharibacteria (0,7 и 1,9% у контрольных и генномодифицированных растений соответственно). В ризосфере трансгенных растений происходит увеличение доли представителей доминантного филума Proteobacteria и снижение относительной доли Bacteroidetes по сравнению с контролем. Представленность остальных филумов не превышает 10% от общего числа секвенсов, различия между контролем и трансгенными растениями составляют менее процента, однако многие представители данных филумов выполняют важные экологические функции.

Так, представители филума Verrucomicrobia широко распространены в почвах, способны к трансформации полисахаридов, азотфиксации, окислению метана и, таким образом, вносят значительный вклад в глобальные циклы углерода и азота [25]. Бактерии филума Chloroflexi ассимилируют CO₂ в процессе аноксигенного фотосинтеза, играют важную роль в разложении сложных органических соединений, что имеет значение для поддержания других бактериальных популяций [26]. Актинобактерии секретируют разнообразные экзоферменты, что обуславливает их высокую биологическую активность в почве, где они выступают, прежде всего, как деструкторы органических веществ, включая такие сложные биополимеры, как хитин, лигнин, целлюлоза, гумусовые вещества. Многие представители этого филума способны продуцировать антибиотики, фитогормоны и другие биологически активные вещества, вступать в разнообразные взаимоотношения с растениями [27].

В микробиоме генетически модифицированных растений отсутствовали бактерии клас-

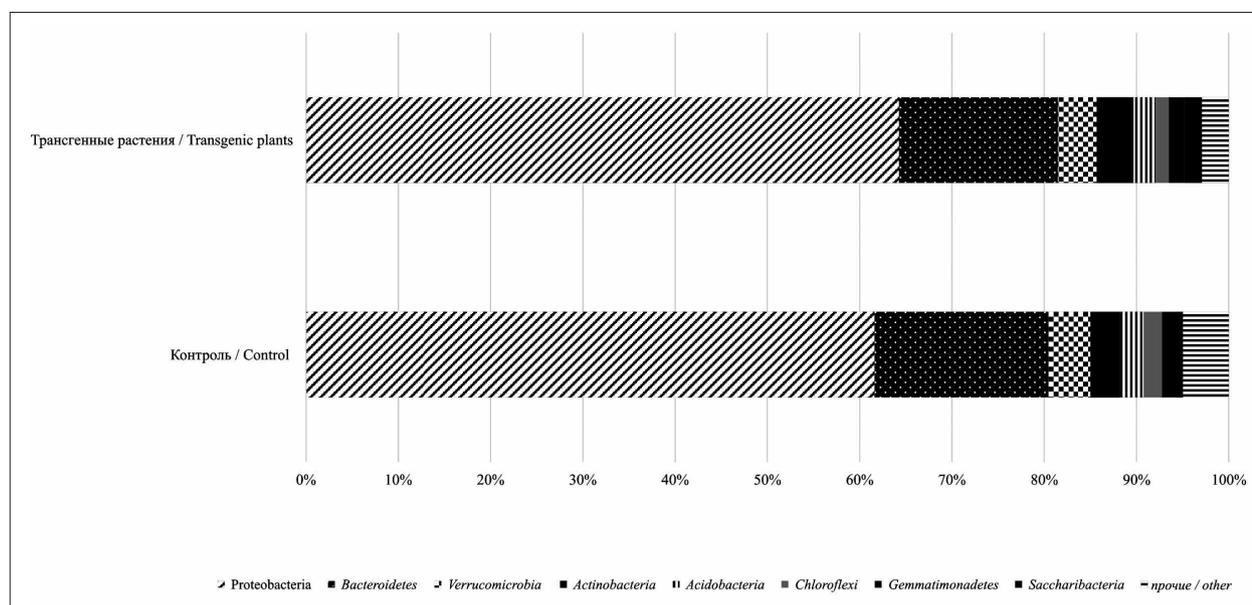


Рис. 2. Структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных и контрольных растений на уровне филумов, % / **Fig. 2.** Bacterial community structure in the rhizosphere of transgenic and control plants at the phylum level, %

сов *Spartobacteria* (филум *Verrucomicrobia*) и *Chloroflexia* (филум *Chloroflexi*), выявленные в ризосфере на контроле. При этом, в составе ризосферного микробиома трансгенных растений идентифицированы представители классов *Caldilineae* (филум *Chloroflexi*) и *Holophagae* (филум *Acidobacteria*), отсутствующие в ризосфере контрольных растений. Бактерии классов *Caldilineae* и *Holophagae* являются солеустойчивыми и выделялись из грунтов морского побережья и засоленных почв [28–30], их появление, возможно, связано с изменениями в химическом составе корневых экссудатов, обусловленными геном, отвечающим за синтез осмотически активного соединения.

Таксономическое разнообразие бактериального сообщества ризосферы на родовом уровне характеризуется преобладанием *Sphingomonas*, *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris*, *Deviosia*, *Bauldia*, доля каждого изменяется в пределах от 2,1 до 6,7%. В ризосфере трансгенных растений наблюдается сокращение долевого участия бактерий *Sphingomonas*, *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris* на 0,6–1,2% и увеличение *Deviosia*, *Bauldia* на 1,2–1,3%. В составе микробиома ризосферы генетически модифицированных растений не выявлены бактерии родов *Sphingobium*, *Pedomicrobium*, присутствующие у контрольных растений, но обнаружены новые члены сообщества родов *Micavibrio*, которые являются хищными бактериями, и *Chryseolinea*. Таким образом, наибольшие изменения происходят внутри

класса *Alphaproteobacteria*, представители которого вступают в тесные взаимоотношения с растениями и выполняют важные экологические функции.

Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что трансгенные по гену холиноксидазы растения томата могут воздействовать на структуру бактериального комплекса ризосферы. Предположительно, это связано с изменением состава корневых экссудатов. Растение формирует свой микробиом и обеспечивает конкурентное преимущество бактериям, способным утилизировать новые компоненты корневых выделений. Представители большей части родов, идентифицированных с помощью проведённого анализа, относятся к типичной почвенной и эпифитной микробиоте, которая осуществляет деструкцию органических веществ, синтез физиологически активных соединений и участвует в биогеохимическом круговороте веществ. Выявленные изменения в филогенетической структуре класса *Alphaproteobacteria* могут повлечь за собой уменьшение доступности некоторых элементов питания для растений и изменение скорости разложения органических веществ в почве. Роль обнаруженных в ризосфере генетически модифицированных растений хищных бактерий рода *Micavibrio* ещё предстоит выяснить.

Работа выполнена в рамках государственного задания FGUM-2022-0003; РФ 122042700002-6 Министерства высшего образования и науки Российской Федерации.

References

- Peng M., Lin X., Xiang X., Ren H., Fan X., Chen K. Characterization and evaluation of transgenic rice pyramided with the *Pi* Genes *Pib*, *Pi25* and *Pi54* // *Rice*. 2021. V. 14. Article No. 78. doi: 10.1186/s12284-021-00512-w
- Mishra V., Mishra R., Shamra R.S. Ribosome inactivating proteins – an unfathomed biomolecule for developing multi-stress tolerant transgenic plants. // *Int. J. Boil. Macromol.* 2022. V. 210. P. 107–122. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.05.004
- Yang Y., Yu T.F., Ma J., Chen J., Zhou Y.B., Chen M., Ma Y.Z., Wei W.L., Xu Z.S. The soybean *bZIP* transcription factor gene *GmbZIP2* confers drought and salt resistances in transgenic plants // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. No. 2. Article No. 670. doi: 10.3390/ijms21020670
- Chouhan R., Ahmed S., Gandhi S.G. Over-expression of PR proteins with chitinase activity in transgenic plants for alleviation of fungal pathogenesis // *J. Plant Pathol.* 2023. V. 105. No. 1. P. 69–81. doi: 10.1007/s42161-022-01226-8
- Semenov M.V., Nikitin D.A., Stepanov A.L., Semenov V.M. The structure of bacterial and fungal communities in the rhizosphere and root-free loci of gray forest soil // *Pochvovedenie*. 2019. No. 3. P. 355–369 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19010131
- Kuzyakov Ya., Razavi B.S. Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity // *Soil Biol. Biochem.* 2019. V. 135. No. 9. P. 343–360. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.05.011
- Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Ogorodnikova S.Yu., Baranova E.N. Changes in the structure of the rhizosphere complexes of actinomycetes of transgenic tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae, Solanales) with the gene *Fe-SOD1* // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2016. No. 3. P. 341–351 (in Russian). doi: 10.18500/1684-7318-2016-3-341-351
- Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., Vivanco J.M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2006. V. 57. P. 233–266. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159
- Zverev A.O., Pershina E.V., Shapkin V.M., Kichko A.K., Mitrofanova O.P., Kobylanskii V.D., Yuzikhin O.S., Belimov A.A., Andronov E.E. Molecular analysis of the rhizosphere microbial communities from gramineous plants grown on contrasting soils // *Microbiology*. 2020. V. 89. No. 2. P. 231–241 (in Russian). doi: 10.31857/S0026365620010188
- Bulgarelli D., Garrido-Oter R., Munch P.C., Weiman A., Dröge J., Pan Y., McHardy A.C., Schulze-Lefert P. Structure and function of the bacterial root microbiota in wild and domesticated barley // *Cell host microbe*. 2015. V. 17. P. 392–403. doi: 10.1016/j.chom.2015.01.011
- Zharkova E.K., Vankova A.A., Selitskaya O.V., Malankina E.L., Drenova N.V., Zhelezova A.D., Khlyustov V.K., Belopukhov S.L., Zhevnerov A.V., Sviridova L.A., Fomina T.N., Kozlov A.V. Bacterial communities of *Lamiaceae* L. medicinal plants: structural features and rhizosphere effect // *Microorganisms*. 2023. V. 11. No. 1. Article No. 197. doi: 10.3390/microorganisms11010197
- Lundberg D.S., Lebeis S.L., Paredes S.H., Yourstone S., Gehring J., Malfatti S., Tremblay J., Engelbrekton A., Kunin V., del Rio T.G., Edgar R.C., Eickhorst T., Ley R.E., Hugenholtz P., Tringe S.G., Dangl J.L. Defining the core *Arabidopsis thaliana* root microbiome // *Nature*. 2012. V. 488. P. 86–90. doi: 10.1038/nature11237
- Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Lysak L.V., Yurchenko E.N. Taxonomic structure of bacterial communities of rhizospheric soil under bog plants // *Lomonosov Soil Science Journal*. 2020. V. 2. P. 45–52 (in Russian). doi: 10.3103/S0147687420020039
- Li P., Dong J., Yang S., Bai L., Wang J., Wu G., Wu X., Yao Q., Tang X. Impact of β -carotene transgenic rice with four synthetic genes on rhizosphere enzyme activities and bacterial communities at different growth stages // *Eur. J. Soil Biol.* 2014. V. 65. P. 40–46. doi: 10.1016/j.ejsobi.2014.09.002
- Savage J.A., Clearwater M.J., Haines D.F., Klein T., Mencuccini M., Sevanto S., Turgeon R., Zhang C. Allocation, stress tolerance and carbon transport in plants: how does phloem physiology affect plant ecology? // *Plant Cell Environ.* 2016. V. 39. No. 4. P. 709–725. doi: 10.1111/pce.12602
- Heuer H., Kroppenstedt R.M., Lottmann J., Berg G., Smalla K. Effects of T4 lysozyme release from transgenic potato roots on bacterial rhizosphere communities are negligible relative to natural factors // *Appl. Environ. Microbiol.* 2002. V. 68. No. 3. P. 1325–1335. doi: 10.1128/AEM.68.3.1325-1335.2002
- Dunfield K.E., Germida J.J. Seasonal changes in the rhizosphere microbial communities associated with field-grown genetically modified canola (*Brassica napus*) // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. V. 69. No. 12. P. 7310–7318. doi: 10.1128/AEM.69.12.7310-7318.2003
- Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Raldugina G.N., Gulevich A.A., Baranova E.N. Analysis of actinobiota in the tobacco rhizosphere with heterologous choline oxidase gene from *Arthrobacter globiformis* // *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*. 2022. V. 2. P. 199–207 (in Russian). doi: 10.31857/S1026347022010139
- Zhao X., Jiang Y., Liu Q., Yang H., Wang Z., Zhang M. Effects of drought-tolerant *Ea-DREB2B* transgenic sugarcane on bacterial communities in soil // *Front. Microbiol.* 2020. V. 11. Article No. 704. doi: 10.3389/fmicb.2020.00704
- Motavalli P.P., Kremer R.J., Fang M., Means N.E. Impact of genetically modified crops and their manage-

ment on soil microbially mediated plant nutrient transformations // *J. Environ. Qual.* 2004. V. 33. No. 3. P. 816–824. doi: 10.2134/jeq2004.0816

21. Dunfield K.E., Germida J.J. Impact of genetically modified crops on soil- and plant-associated microbial communities // *J. Environ. Qual.* 2004. V. 33. No. 3. P. 806–815. doi: 10.2134/jeq2004.0806

22. Lebedev V., Lebedeva T., Tikhonova E., Shestibratov K. Assessing impacts of transgenic plants on soil using functional indicators: twenty years of research and perspectives // *Plants.* 2022. V. 11. Article No. 2439. doi: 10.3390/plants11182439

23. Gulevich A.A., Kurenina L.V., Baranova E.N. The application of targeting of Fe-dependent superoxide dismutase and choline oxidase enzymes into chloroplast as a strategy for effective plant protection against abiotic stresses // *Russian Agricultural Sciences.* 2018. No. 1. P. 7–12 (in Russian). doi: 10.3103/S1068367418020076

24. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue culture // *Physiol. Plant.* 1962. V. 15. P. 473–497. doi: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

25. Cabello-Yeves P.J., Ghai R., Mehrshad M., Picazo A., Camacho A., Rodriguez-Valera F. Reconstruction of diverse verrucomicrobial genomes from metagenome datasets of freshwater reservoirs // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8. Article No. 2131. doi: 10.3389/fmicb.2017.02131

26. Speirs L.B., Rice D.T., Petrovski S., Seviour R.J. The phylogeny, biodiversity, and ecology of the *Chloroflexi* in activated sludge // *Front. Microbiol.* 2019. V. 10. Article No. 2015. doi: 10.3389/fmicb.2019.02015

27. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V. Ecological features and biotechnological possibilities of soil actinobacteria (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2023. No. 2. P. 6–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-006-019

28. Herlemann D.P., Lundin D., Labrenz M., Jürgens K., Zheng Z., Aspeborg H., Andersson A.F. Metagenomic de novo assembly of an aquatic representative of the verrucomicrobial class *Spartobacteria* // *MBio.* 2013. V. 4. No. 3. Article No. e00569-12. doi: 10.1128/mBio.00569-12

29. Harpke M., Pietschmann S., Costa F.S., Gansert C., Langenhorst F., Kothe E. Biomineralization by extremely halophilic and metal-tolerant community members from a sulfate-dominated metal-rich environment // *Microorganisms.* 2021. V. 10. No. 1. Article No. 79. doi: 10.3390/microorganisms10010079

30. Gao F., Li F., Tan J., Yan J., Sun H. Bacterial community composition in the gut content and ambient sediment of sea cucumber *Apostichopus japonicus* revealed by 16S rRNA gene pyrosequencing // *PloS One.* 2014. V. 9. No. 6. Article No. e100092. doi: 10.1371/journal.pone.0100092

Изучение физиологических особенностей растений в условиях захоронения нефтепродуктов под слоем почвы

© 2025. Т. А. Трифонова^{1,2}, д. б. н., профессор,
Ю. Н. Курбатов¹, аспирант,

¹Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,
e-mail: tatrifon@mail.ru, iur.curbatov@gmail.com

В лабораторных условиях смоделирована ситуация незаконного захоронения нефтепродуктов, засыпанных слоем почвы. Исследовано влияние резервуара с отработанным маслом на физиологическое состояние растений трёх семейств: Бобовые (*Trifolium pratense* L.), Крестоцветные (*Sinapis alba* L.), Злаковые (*Avena sativa* L.). Выявлено отрицательное влияние данного загрязнения на фитомассу, всхожесть и энергию прорастания. Растения продемонстрировали различный адаптационный потенциал к воздействию поллютанта. Исследовано содержание фотосинтетических пигментов листа растений. Установлено, что их ассимиляционный аппарат реагирует на загрязнитель неоднозначно. Клевер показал высокие адаптационные возможности к загрязнению почвы нефтепродуктами в концентрациях 10 и 20 г/кг, горчица лучше переносит повышенные загрязнения (20 и 40 г/кг). Растения овса в начале эксперимента испытывали стимулирующее воздействие со стороны поллютанта, что выражалось в быстром наборе фитомассы, высоких показателях всхожести и энергии прорастания, однако затем этот эффект сменился резким увяданием, сопровождавшимся разрушением ассимиляционных пигментов (при дозах отработанного масла 10 и 20 г/кг). Однако в варианте с дозой 40 г/кг продолжалось стимулирующее влияние загрязнителя: отмечалось увеличение концентрации хлорофилла *b* и каротиноидов по сравнению с контролем.

Ключевые слова: фитомасса, всхожесть, энергия прорастания, фотосинтетические пигменты, нефтепродукты, загрязнение.

The study of the physiological characteristics of plants in the conditions of petroleum products disposal under the soil layer

© 2025. T. A. Trifonova^{1,2} ORCID: 0000-0002-1628-9430^{*}
Yu. N. Kurbatov¹ ORCID: 0000-0002-0904-3854^{*}

¹Vladimir State University,
87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,

²Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991,

e-mail: tatrifon@mail.ru, iur.curbatov@gmail.com

The illegal disposal of petroleum products under the soil layer was simulated in laboratory conditions. The samples of medium loamy urban soil were studied. We study the effect of the tank with waste oil on the physiological state of plants of three families: Legumes (*Trifolium pratense* L.), Cruciferous (*Sinapis alba* L.), and Cereals (*Avena sativa* L.). Wild plants were selected for the experiment. This allows us to assess the effect of the illegal dumping of petroleum products into the natural environment on plants physiological state. We reveal the negative effect of this pollution on phytomass, germination rate and germination energy. Plants showed different adaptive potential to the pollutant effect. The content of photosynthetic pigments in plant leaves was studied. We found that plants' assimilation apparatus reacts ambiguously to the pollutant. The clover showed high adaptive capacity to soil contamination with petroleum products at concentrations of 10 and 20 g/kg. Mustard better tolerates increased contamination (20 and 40 g/kg). At the beginning of the experiment, oat plants experienced a stimulating effect, expressed in a rapid increase in phytomass, high rates of germination and germination energy. Later this effect was replaced by a sharp wilting, accompanied by the destruction of assimilation pigments (at 10 and 20 g/kg doses of waste oil). However, in the variant with a 40 g/kg dose, the stimulating effect of the pollutant continued: there was an increase in chlorophyll *b* and carotenoids content compared to the control.

Keywords: phytomass, germination rate, germination energy, photosynthetic pigments, petroleum products, pollution.

Проблема утилизации нефти и продуктов её переработки, в частности отработанного масла, является особенно актуальной во всём мире. Согласно оценкам зарубежных исследователей, на планете ежегодно производится около 40 млн т моторных масел, из них образуется впоследствии около 60% отработанных масел [1]. Из этого количества менее 45% доступны для сбора, переработки и регенерации, а оставшиеся 55% утилизируются нелегальным образом, в том числе сбрасываются на почву или в водоёмы [2]. В связи с этим создаётся опасность возникновения незаконного захоронения нефтепродуктов (НП), что приводит к необходимости исследования влияния данного явления на живые организмы, в частности растения.

В настоящее время активно изучается влияние нефтяного загрязнения на развитие высших растений различных классов и семейств [3–6], исследуются особенности развития растений на рекультивированных нефтезагрязнённых почвах [7], оценивается воздействие со стороны поллютанта на их фотосинтетическую активность и пигментный аппарат [8–10], изучается фиторемедиационный потенциал растений к очистке почв, загрязнённых отработанным маслом [11]. Однако преимущественно исследуются варианты поступления нефтяных углеводородов на поверхностный слой почвы или их распространение в газообразном состоянии. Ситуация с захоронением резервуара с НП под слоем почвы практически не рассматривается учёными.

В связи с этим, целью данного исследования является изучение в условиях лабораторного моделирования физиологических особенностей растений, произрастающих на территории незаконного захоронения нефтепродуктов, засыпанных слоем почвы.

Объекты и методы исследования

В работе представлены данные лабораторного эксперимента, моделирующего несанкционированные захоронения НП с последующим их засыпанием слоем почвы. В этих условиях оценивалось влияние поллютанта на физиологическое состояние растений 3 семейств: Бобовые (*Trifolium pratense* L.), Крестоцветные (*Sinapis alba* L.), Злаковые (*Avena sativa* L.). Растения, выбранные для эксперимента, являются дикорастущими, что позволяет оценить влияние на их физиологическое состояние ситуации возникновения

незаконного захоронения НП в естественной природной среде. Кроме того, для них характерны различные типы корневых систем – стержневая и мочковатая; данные особенности могут оказывать непосредственное влияние на жизнедеятельность растений при воздействии поллютанта из глубины почвы.

Исследования проводились на почвенных образцах среднесуглинистого урбанозёма, содержание гумуса – 3,32%, $pH_{\text{водн}}$ – 7,7, pH_{KCl} – 7,3. Отбор почвы производился с глубины 0–20 см по ГОСТ Р 58595-2019. Водородный показатель солевой и водной вытяжек почв определяли согласно ГОСТ 26423-85.

В качестве поллютанта использовали отработанное машинное масло для автотракторных дизелей марки М-8ДМ, изготовленное по ГОСТ 8581-78. Исследование углеводородного состава отработанного масла было произведено методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре «ИнфРАЛЮМ ФТ-08» по ПУ 03-2002 «Инструкция по проведению и идентификации нефтепродуктов с помощью ИК Фурье-спектрометра «ИнфРАЛЮМ ФТ-02». Согласно результатам ИК-спектроскопии, углеводородный состав отработанных масел представлен (в %): алканы – 87,36; арены – 6,73; нафены – 4,73; окисленные вещества – 1,18.

Опыты с каждой культурой растений закладывали в двух повторностях – на дно двухлитровых контейнеров площадью 0,02 м² приливали дозы отработанного масла из расчёта 10, 20 и 40 г/кг почвы соответственно. На слой НП насыпали 1 кг почвы, которая равномерно пропитывалась поллютантом на дне контейнера. Таким образом, верхний слой почвы в контейнере оставался незагрязнённым, и туда высевались семена культур в соответствии с нормами посева на обрабатываемую площадь (количество семян на площадку: клевер – 25 ед., овёс и горчица – по 15 ед.) Аналогичным образом были подготовлены контрольные контейнеры для каждой культуры – без добавления поллютанта. Эксперимент длился 60 дней, по истечении которых верхняя часть растений срезалась и подвергалась исследованиям.

Надземную фитомассу оценивали в сыром виде гравиметрическим методом. Всхожесть и энергию прорастания семян исследуемых растений рассчитывали по ГОСТ 12038-84. Определение пигментного состава сырой биомассы растений, а именно хлорофилла *a* (X_{l_a}), хлорофилла *b* (X_{l_b}) и каротиноидов (K), производили спектрофотометрическим

методом на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ. Содержание пигментов оценивали по оптическим плотностям при длинах волн, соответствующих максимумам их поглощения: для $X_{л_a} - 663$ нм, $X_{л_b} - 644$ нм, $K - 452,5$ нм. В качестве экстрагента использовали 85%-ный раствор ацетона, расчёт концентрации ассимиляционных пигментов производили по уравнениям 1–4 Реббелена [12]:

$$C_a = 10,3 \times D_{663} - 0,918 \times D_{644}, \quad (1)$$

$$C_b = 19,7 \times D_{644} - 3,87 \times D_{663}, \quad (2)$$

$$C_a + C_b = 6,4 \times D_{663} + 18,8 \times D_{644}, \quad (3)$$

$$C_k = 4,75 \times D_{452,5} - 0,226 \times C_{a+b}, \quad (4)$$

где C_a, C_b, C_k – концентрации хлорофиллов a, b и каротиноидов соответственно, мг/дм³; $D_{663}, D_{644}, D_{452,5}$ – оптические плотности вытяжек пигментов при длинах волн, соответствующих их максимальному поглощению.

Для пересчёта содержания фотосинтетических пигментов на сырую массу использовали массу навесок сырых листьев и объём полученного фильтрата пигментов. Содержание пигментов представлено в мг/г сырой фитомассы.

Статистическую обработку данных проводили в программе STATISTICA. Для определения достоверности различий между выборками использовали непараметрический U-критерий Манна-Уитни при уровне

значимости $p < 0,05$. На рисунках приведены значения стандартных погрешностей.

Результаты и обсуждение

На начальном этапе исследования с целью оценки влияния загрязнения почвы НП на рост и развитие растений была оценена их фитомасса в сыром состоянии. Результаты взвешивания представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что концентрации НП 10, 20 и 40 г/кг почвы приводят к уменьшению массы надземной части растений клевера относительно контрольных значений соответственно на 25, 17 и 39%. Это явление, кроме непосредственного отрицательного влияния НП, может также объясняться низкими показателями всхожести растений клевера на загрязнённой почве, о чём пойдет речь ниже. Ростки горчицы так же показывают обратную связь с увеличением дозы НП уменьшается их фитомасса (до 44–58% относительно контроля при разных дозах НП). Масса надземной части овса посевного прямо пропорциональна дозе внесённого поллютанта: с увеличением концентрации НП в почве происходит увеличение фитомассы в диапазоне 7,7–40% в сравнении с контрольными растениями.

Обнаруженные закономерности могут объясняться особенностями корневой системы

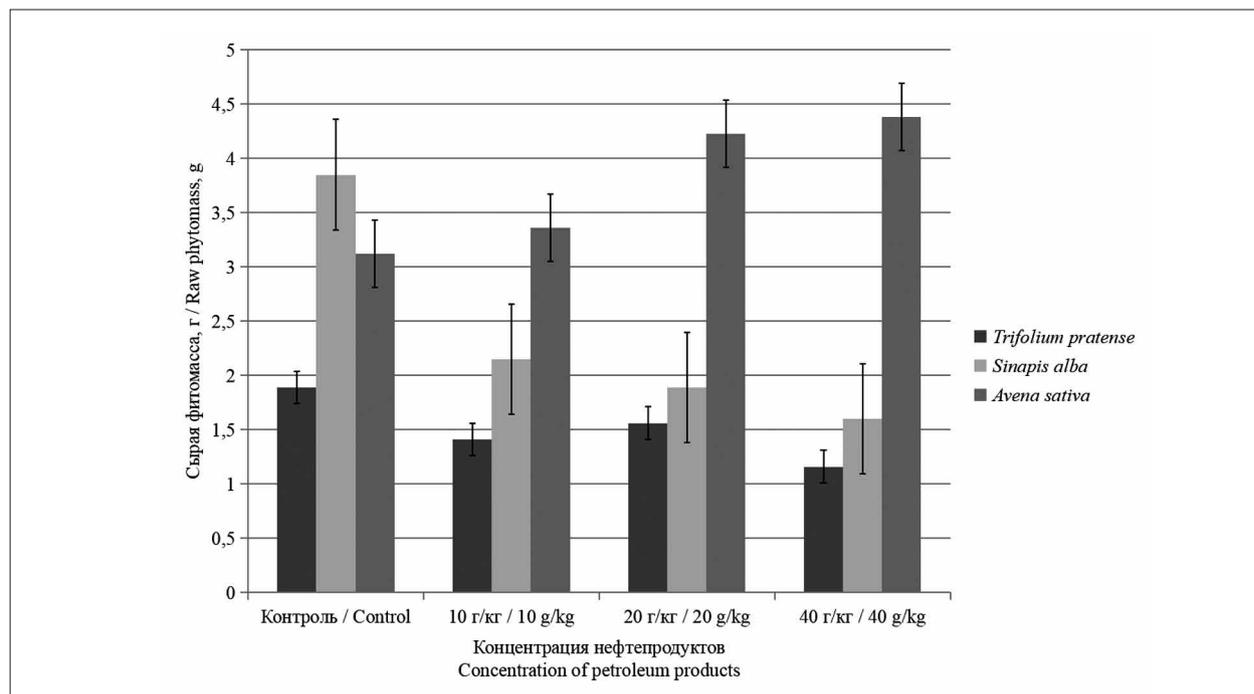


Рис. 1. Фитомасса растений, собранная с контрольных и опытных участков спустя 2 месяца с начала эксперимента (с указанием стандартных погрешностей)

Fig. 1. Plant phytomass in control and experimental plots 2 months after the start of the experiment (indicating standard errors)

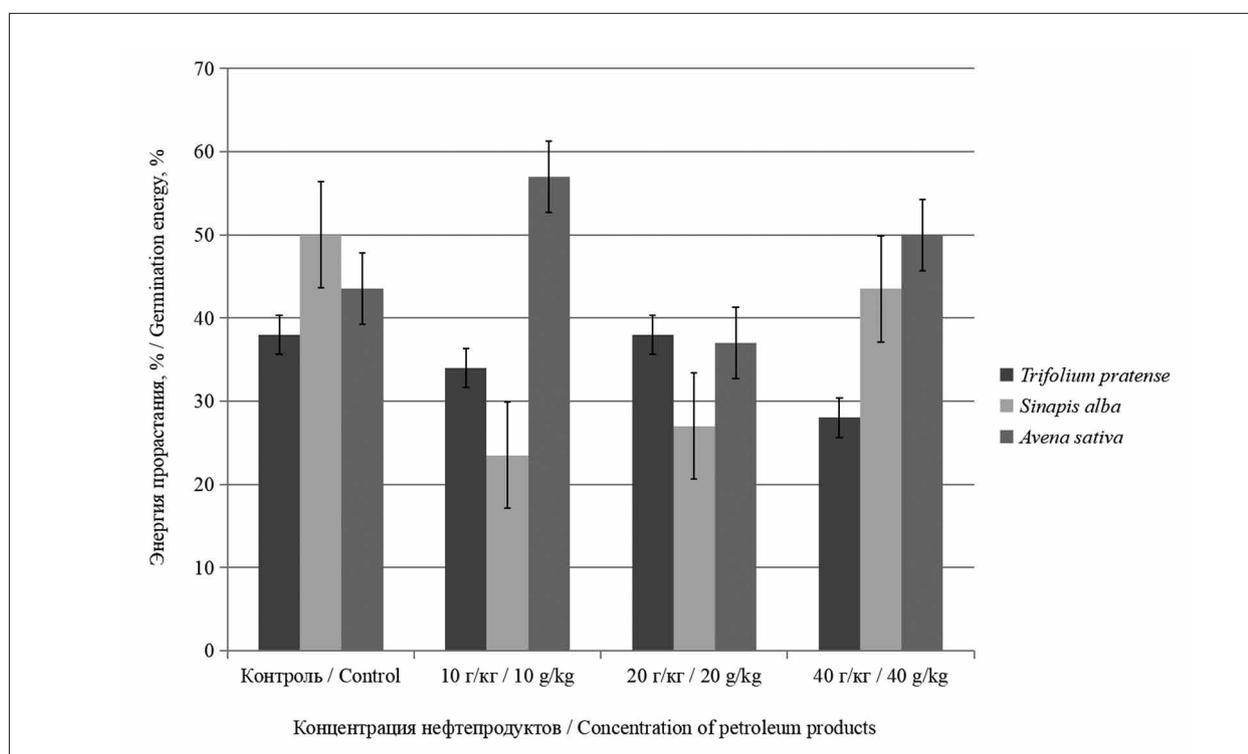


Рис. 2. Энергия прорастания семян, произраставших на почве с разными дозами нефтепродуктов (с указанием стандартных погрешностей)
Fig. 2. Seed germination energy at different content of petroleum products in soil (indicating standard errors)

изучаемых растительных организмов. Клевер и горчица относятся к классу Двудольные и имеют стержневую корневую систему, которая в условиях эксперимента могла достигать вглубь контейнера зоны расположения НП, что в конечном итоге приводило к уменьшению минерального и водного питания растений вследствие гидрофобных свойств, которые приобретают почвенные частицы под влиянием отработанного масла. Подробные выводы были сделаны исследователями в работах [13–15]. В публикации [16] авторами также было отмечено снижение фитомассы гороха (сем. Бобовые), с увеличением концентрации НП в почве выше 1 г/кг. В работе [7] отмечается торможение роста растений гороха в почве с концентрацией НП 11,7 г/кг почвы и выше с тенденцией увеличения токсического эффекта к концу эксперимента, длившегося в течение 44 суток.

Овёс посевной относится к однодольным, и для него характерна мочковатая корневая система, которая в условиях данного эксперимента располагалась преимущественно в поверхностном слое почвы и не достигала глубины залегания НП, то есть растения не испытывали непосредственного негативного влияния со стороны поллютанта на начальной стадии эксперимента. Однако к окончанию

эксперимента растения, произраставшие на площадках с дозами НП 10 и 20 г/кг почвы, начали активно увядать, о чём можно судить по данным спектрофотометрического анализа их ассимиляционного аппарата, представленным ниже. Начальный стимулирующий эффект в отношении растений овса может объясняться косвенным воздействием со стороны НП. Известно, что низкомолекулярные углеводороды, образующиеся в ходе разложения НП, способны усваиваться растениями, и с помощью капиллярных сил могут достигать прикорневой зоны и использоваться ими в ходе дальнейших физиологических превращений с целью получения энергии, что подтверждается данными некоторых авторов [17].

С целью оценки быстроты и дружности всходов исследуемых растений была подсчитана энергия их прорастания. Результаты исследований показаны на рисунке 2.

Согласно данным, представленным на рисунке 2, энергия прорастания семян на контрольных участках для всех растений имеет средние показатели (38–50%). Для клевера на опытных площадках характерно уменьшение энергии прорастания по сравнению с контролем на 4–8%. Для горчицы наблюдается существенное ингибирование

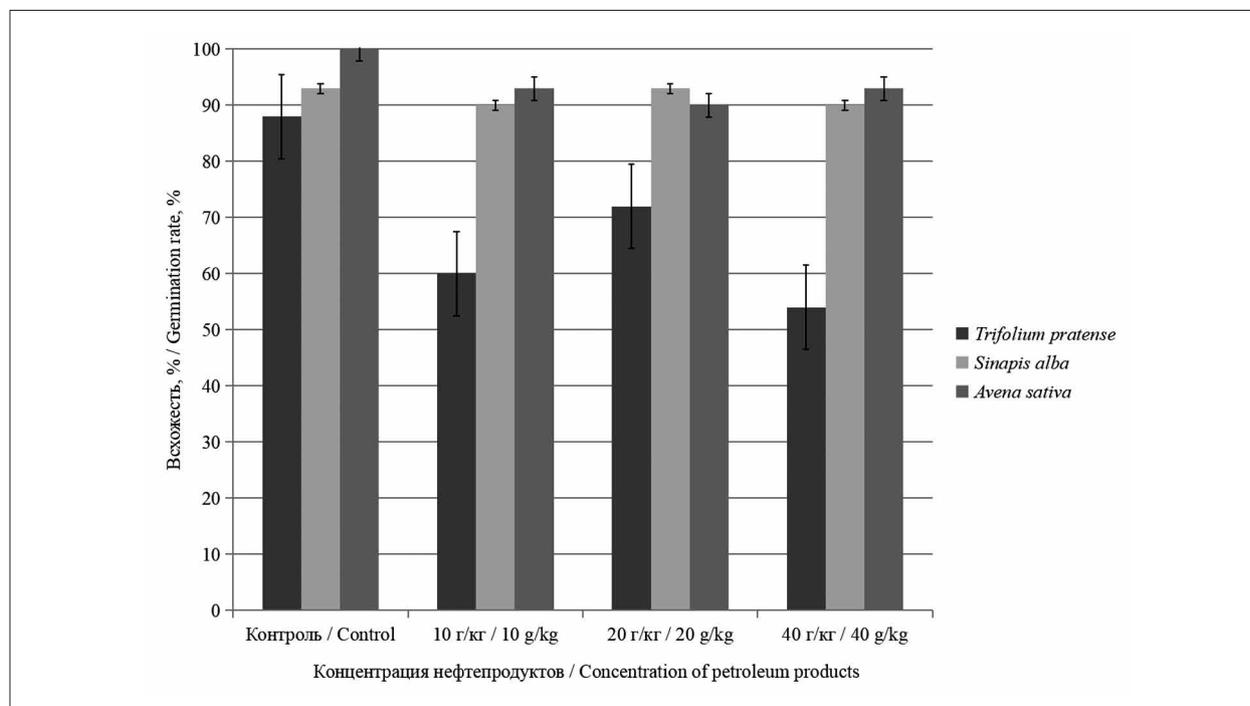


Рис. 3. Всхожесть семян, выявленная для трёх культур при разных дозах НП в почве (с указанием стандартных погрешностей)
Fig. 3. Seed germination rate at different content of petroleum products in soil (indicating standard errors)

скорости прорастания семян в условиях загрязнения почвы НП (показатель ниже контроля на 6,0–26,5%). Для овса характерно увеличение энергии прорастания при дозах НП 10 и 40 г/кг почвы на 13,5 и 6,5% соответственно и незначительное ингибирование скорости прорастания при средней дозе – 20 г/кг (меньше контроля на 6,5%). В целом, наличие НП в почве оказывает на семена овса стимулирующее воздействие. Такой эффект может объясняться наличием в отработанном масле окисленных структур, представляющих собой нефтяные кислоты (согласно данным ИК-спектроскопии, их количество составляет 1,18%). Нефтяные кислоты могут выступать стимуляторами роста на стадии прорастания семян, что подтверждается исследованиями некоторых авторов [18].

В ходе эксперимента была определена всхожесть семян исследуемых растений. Результаты исследования отражены на рисунке 3.

При анализе данных, представленных на рисунке 3, видно, что все растения контроля имели высокие показатели всхожести (88–100%). Для опытных вариантов всхожесть 90% и выше показали семена горчицы и овса. По-видимому, НП, заключённые на дне контейнера, на этапе прорастания не оказали сильного отрицательного влияния на семена данных растений, несмотря на неоднозначные

результаты по их энергии прорастания. Семена клевера показали тенденцию к уменьшению всхожести в условиях эксперимента, что также коррелирует с данными по энергии прорастания. Вероятно, это связано с наличием в отработанном масле токсичных фракций углеводов или летучих и водорастворимых продуктов их расщепления, которые могут проникать в семена клевера через почвенные поры. Согласно данным, полученным методом ИК-спектроскопии, в отработанном масле, использованном нами в качестве поллютанта, было обнаружено высокое содержание ароматических углеводов – 6,73%. Известно, что в процессах разложения НП важную роль выполняет в том числе фотохимическое разложение [19]. Контейнеры, использованные нами в ходе опыта, были прозрачные и могли пропускать УФ-излучение, способствующее разложению ПАУ, входящих в состав отработанного масла, таких как бенз[а]пирен (БП) [20]. Конечные продукты разложения БП являются низкомолекулярными, растворимыми в воде веществами, которые могут по капиллярам почвы достигать зоны залегания семян и поглощаться ими, что может приводить к уменьшению жизнеспособности семян и ингибированию их всхожести [19].

Процесс фотосинтеза является чрезвычайно чувствительным по отношению к на-

личию в окружающей среде загрязняющих веществ [21]. Поэтому с целью оценки физиологического состояния растений в условиях загрязнения почвы НП был исследован их фотосинтетический аппарат – содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов, обеспечивающих в том числе антиоксидантную защитную функцию растений [9]. Результаты анализа представлены на рисунках 4–6.

Исходя из данных рисунка 4, можно заключить, что на фотосинтетический аппарат клевера оказывается стимулирующее воздействие со стороны поллютанта при низких и средних его концентрациях и ингибирующее – при высоких. Так, при дозах НП 10 и 20 г/кг почвы наблюдается увеличение концентрации Хл_{*a*} на 31 и 89%, Хл_{*b*} – на 26 и 135%, К – на 35 и 91% соответственно. Прямая зависимость между этими параметрами доказывает высокие адаптационные возможности клевера к данной степени загрязнения почвы, что подтверждается данными исследователей [22]. Высокая доза НП (40 г/кг) оказывает ингибирующее влияние, о чём говорит снижение концентраций пигментов относительно контроля (Хл_{*a*} до 15%, Хл_{*b*} – до 17%, К – до 12%). В целом, по степени адаптации ассимиляционного аппарата к воздействию НП клевер показывает устойчивость к загрязнению до 20 г/кг почвы, более

высокие дозы (до 40 г/кг и выше) оказывают ингибирующее воздействие на синтез фотосинтетических пигментов.

На рисунке 5 показано, что в случае с дозой НП 10 г/кг почвы содержание Хл_{*a*}, Хл_{*b*} и К в горчице белой уменьшилось на 41, 45 и 38% соответственно. Дозы НП 20 и 40 г/кг способствовали формированию у растений горчицы более мощного ассимиляционного аппарата. Для первого случая отмечается увеличение Хл_{*a*} в 1,3 раза, Хл_{*b*} в 2,4 раза и К в 1,4 раза по сравнению с контролем. В случае с высокой дозой НП (40 г/кг) отмечается увеличение этих показателей в 1,4, 2 и 1,5 раза соответственно. Таким образом, увеличение содержания фотосинтетических пигментов в растениях горчицы белой говорит о том, что она обладает высоким адаптационным потенциалом по отношению к сильному загрязнению почв НП и испытывает повышенный стресс в случае с низким в условиях данного эксперимента загрязнением. Важно отметить, что с увеличением степени загрязнения почвы поллютантом для растений горчицы характерно уменьшение общей фитомассы, однако ассимиляционный аппарат этих растений, напротив, приобретает большую приспособленность к негативным условиям для произрастания. Такую же зависимость обнаружили исследователи в работе [23], при изучении влияния нефтезагрязнён-

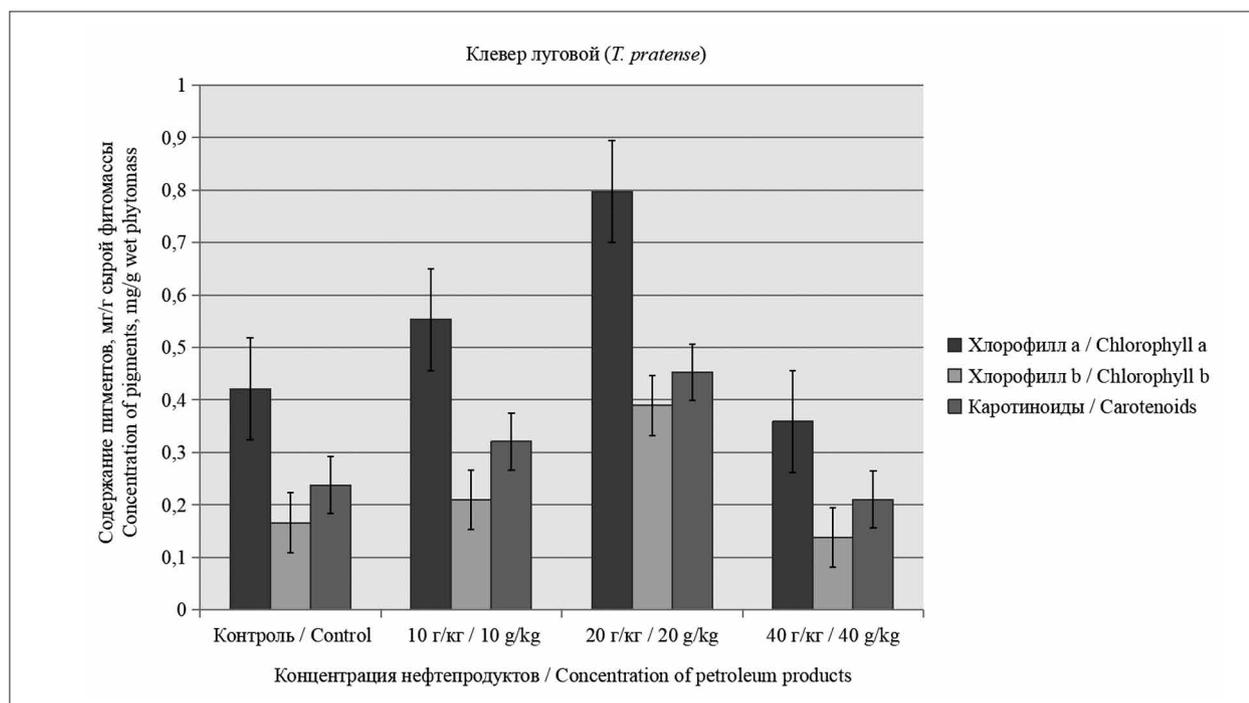


Рис. 4. Концентрация пигментов в листьях *Trifolium pratense*, произраставшего на почвах с различными дозами нефтепродуктов (с указанием стандартных погрешностей)
Fig. 4. Pigment concentration in *Trifolium pratense* leaves on soils with different content of petroleum products (indicating standard errors)

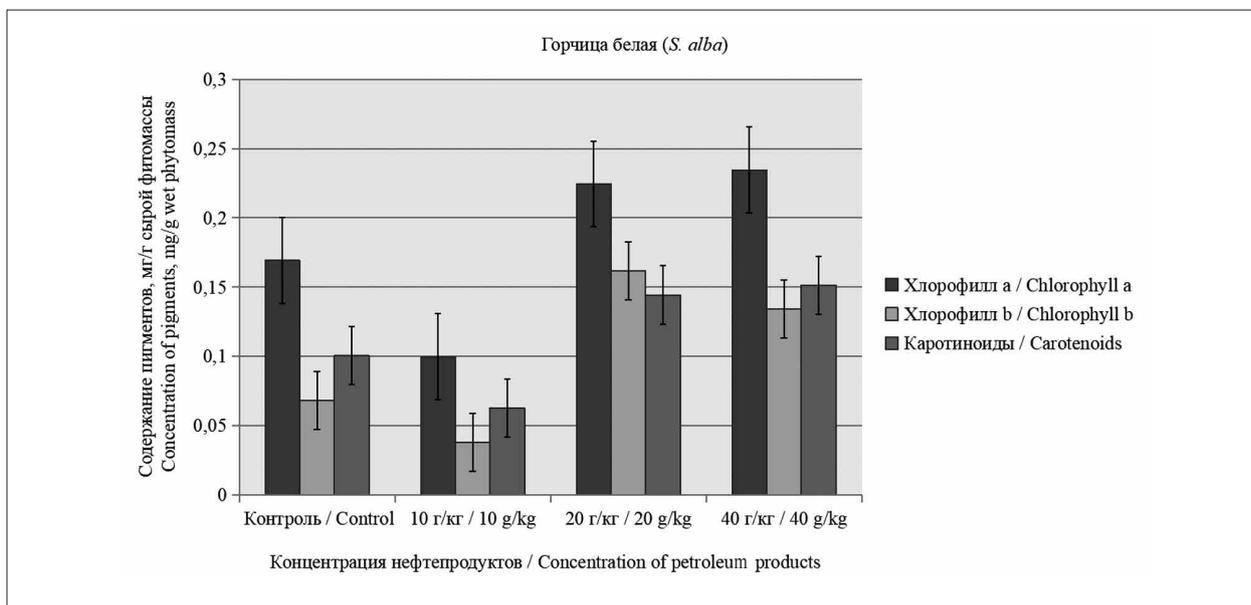


Рис. 5. Концентрация пигментов в листьях *Sinapis alba*, произраставшей на почвах с различными дозами нефтепродуктов (с указанием стандартных погрешностей)
Fig. 5. Pigment concentration in *Sinapis alba* leaves on soils with different content of petroleum products (indicating standard errors)

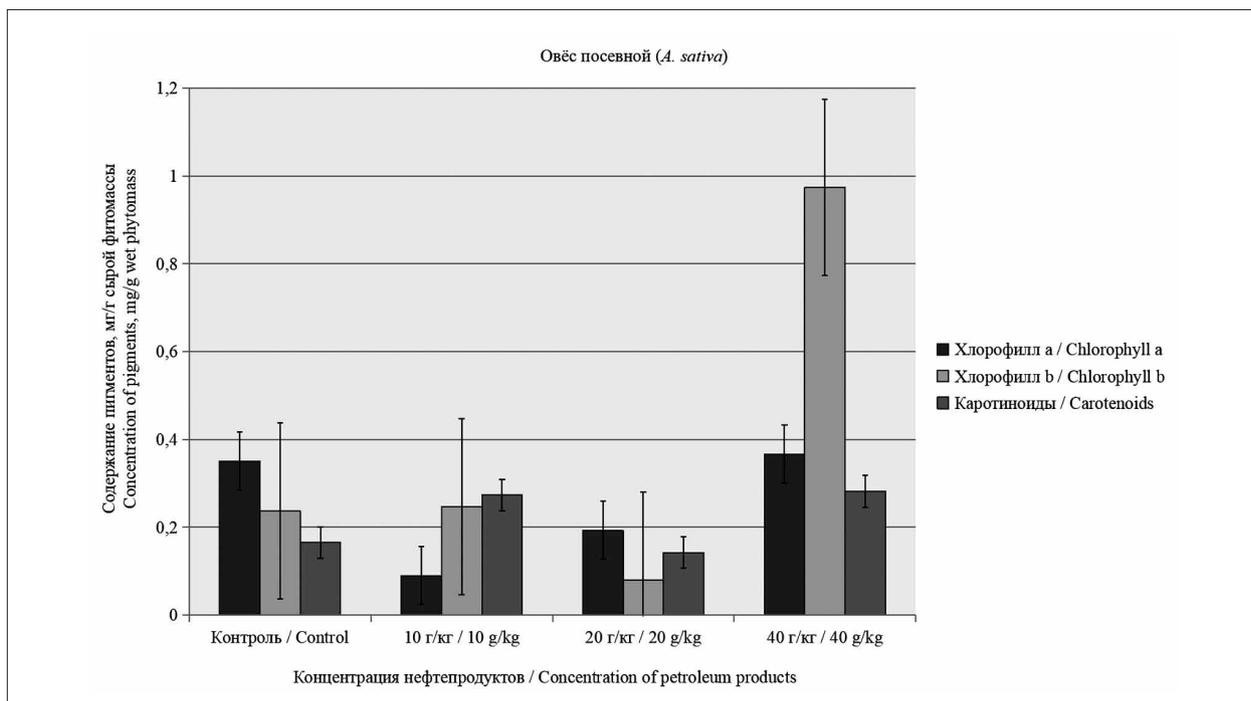


Рис. 6. Концентрация пигментов в листьях *Avena sativa*, произраставшего на почвах с различными дозами нефтепродуктов (с указанием стандартных погрешностей)
Fig. 6. Pigment concentration in *Avena sativa* leaves on soils with different content of petroleum products (indicating standard errors)

ной почвы на биологическую продуктивность и активность фотосинтетического аппарата пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L., 1753) и осоки острой (*Carex acuta* L., 1753).

Результаты исследования фотосинтетического аппарата овса посевного (рис. 6) сви-

детельствуют о значительном ингибирующем воздействии поллютанта на растения. Так, доза НП 10 г/кг почвы привела к уменьшению содержания Хл_а на 74%, Хл_б остался примерно на уровне контроля, однако концентрация К увеличилась на 65% относительно контроля.

По этим данным можно предположить, что растения компенсировали разрушение системы $X_{л_a}$ с помощью синтеза K , являющихся вспомогательными фотосинтетическими пигментами, а также выполняющих фотозащитную и антиоксидантную функции [9]. Со стороны дозы НП 20 г/кг почвы также отмечается эффект угнетения растений – концентрации пигментов уменьшились, соответственно на 45, 66 и 14% относительно контрольного варианта. Доза 40 г/кг, напротив, в условиях эксперимента показала выраженное стимулирующее воздействие на фотосинтетический аппарат овса: содержание $X_{л_a}$ практически не изменилось, концентрация $X_{л_b}$ превышает контроль в 4,1 раза, K – в 1,7 раза. Подобные результаты были получены учёными при исследовании влияния НП на осоку острую [24], коострец безостый и овсяницу красную [22]. Интересно отметить, что содержание $X_{л_b}$ в последнем варианте опыта превышает содержание $X_{л_a}$ почти в 3 раза. Некоторые исследователи связывают это с адаптацией растений к неблагоприятным условиям и повышению их экологической устойчивости, а обратную направленность в изменении этих показателей связывают либо с процессами повреждения растений, либо со стимуляцией жизненных процессов в целом и роста в частности [23].

Такое противоречие в быстром наборе фитомассы с последующим разрушением фотосинтетического аппарата объясняется тем, что спустя 2 месяца с начала эксперимента отмечался процесс активного увядания растений, растущих в контейнерах с дозами НП 10 и 20 г/кг почвы, что не было характерно для контроля и вариантов с высокой концентрацией НП. По-видимому, здесь имеет место явление гормезиса, в данном случае наиболее благоприятное влияние на растения оказывает наличие в почве НП высокой концентрации (40 г/кг почвы). Однако, не ясно, не вызовет ли эта доза загрязнения увядание овса при продолжении эксперимента дольше 60 суток. По сформированной растениями фитомассе можно предположить, что эффект гормезиса усиливается с увеличением содержания поллютанта в почве, однако по прошествии некоторого времени стимулирующий эффект переходит в угнетение растений с последующим их увяданием.

Заключение

Таким образом, отработанное масло, находящееся в глубине почвы, оказывает преимущественно негативное воздействие на физио-

логическое состояние растений. Так, клевер и горчица испытывают значительный стресс со стороны НП, что выражается в снижении их фитомассы, энергии прорастания и показателей всхожести (у клевера). Фотосинтетический аппарат этих растений реагирует на загрязнитель неоднозначным образом: клевер луговой показывает высокие адаптационные возможности к загрязнению почвы концентрациями НП 10 и 20 г/кг, горчица лучше переносит повышенные загрязнения (20 и 40 г/кг). Овёс посевной в условиях эксперимента сформировал наибольшую фитомассу, которая находилась в прямой зависимости от концентрации поллютанта, энергия прорастания и всхожесть свидетельствовали о минимальном воздействии со стороны НП на жизнеспособность семян этих растений. Однако в конце эксперимента растения овса посевного начали активно увядать, что выразилось в разрушении пигментного аппарата в случае с низкой (10 г/кг) и средней (20 г/кг) дозами НП. На площадке с высокой концентрацией поллютанта процессов увядания не обнаруживалось, однако соотношение $X_{л_a}$ к $X_{л_b}$ составило 1:3, что говорит об адаптации растений к воздействию НП за счёт увеличения содержания в листьях вспомогательного $X_{л_b}$. Вероятно, в данном случае имеет место эффект гормезиса, выражающийся в интенсивном наборе фитомассы при кратковременном воздействии со стороны поллютанта и последующем выраженном угнетающем воздействии, проявляющемся по прошествии 1,5 месяцев с начала эксперимента. Это может быть связано с конвекционным поступлением поллютанта в верхние слои почвы, образованием при разложении отработанного масла токсичных для растений веществ.

Литература

1. Bani-hani E., Alkhatib F., Sedaghat A., Alkhazzam A., Al-Dousari F., Al-Saad O. An experimental study on producing a sustainable diesel-like fuel from waste engine oil // Renewable Energy Research and Application. 2020. V. 1. No. 2. P. 143–150. doi: 10.22044/rera.2020.9173.1020
2. Pelitli V., Doğan Ö., Koroğlu H.J. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes // Global Journal of Environmental Science and Management. 2017. V. 3. No. 1. P. 11–20. doi: 10.22034/gjesm.2017.03.01.002
3. Акатьева Т.Г. Влияние нефтяного загрязнения на рост и развитие *Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Phalaris canariensis* // Вестник НВГУ. 2021. № 2 (54). С. 127–134. doi: 10.36906/2311-4444/21-2/17

4. Sorana O.Ț., Mihăilescu S., Strat D., Florentina G.I. Effects of oil pollution on seed germination and seedling emergence toxicity // Rom. Biotechnol. Lett. 2020. V. 25. No. 1. P. 1194–1201. doi: 10.25083/rbl/25.1/1194.1201
5. Степаненко Е.А., Волкова И.В., Алферова В.А., Сейдалиева Л.К. Изучение реакции бархатцев прямостоячих (*Tagetes erecta*) на нефтяное загрязнение // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 2. С. 83–88. doi: 10.24143/1812-9498-2023-2-83-88
6. Курбатов Ю.Н., Трифонова Т.А. Исследование интегральной токсичности почвы, загрязнённой нефтепродуктами // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 141–150. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-141-150
7. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А. Развитие одно- и двудольных растений на рекультивированных нефтезагрязнённых аллювиальных дерновых почвах // Вестник НВГУ. 2022. № 1 (57). С. 91–101. doi: 10.36906/2311-4444/22-1/10
8. Иванова Н.А., Корчагина Л.Е. Особенности фотосинтетической активности и пигментного аппарата листьев растений в условиях нефтяного загрязнения на территории Среднего Приобья // Естественные науки. 2012. № 1 (38). С. 37–46.
9. Маслова Т.Г., Марковская Е.Ф., Слемнев Н.Н. Функции каротиноидов в листьях высших растений (обзор) // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81. № 4. С. 297–310. doi: 10.31857/S0044459620040065
10. Христин М.С., Ланкин А.В., Креславский В.Д. Поглощение нафталина листьями и его взаимодействие с хлорофилл-белковыми комплексами растений гороха // Физиология растений. 2020. Т. 67. № 4. С. 400–407. doi: 10.31857/S0015330320040090
11. Walakulu Gamage S.S., Masakorala K., Brown M.T., Widana Gamage S.M.K. Tolerance of *Impatiens balsamina* L., and *Crotalaria retusa* L. to grow on soil contaminated by used lubricating oil: A comparative study // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2020. V. 188. Article No. 109911. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109911
12. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зелёных листьев // Биохимические методы в физиологии растений / Отв. редактор О. А. Павлинова. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
13. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С., Хлынина Н.И. Углеводородное состояние почв при разновозрастном нефтяном загрязнении // Почвоведение. 2016. № 5. С. 574–583. doi: 10.7868/S0032180X16050051
14. Заушинцева А.В., Заушинцен А.С., Мальцева А.Т., Свиркова С.В., Тарасова И.В., Барышева О.В. Реакция растительного покрова на загрязнение почвы нефтепродуктами // Вестник КемГУ. 2014. Т. 2. № 1 (57). С. 7–12.
15. Trifonova T.A., Alkhutova E.Y. Phytomass change in natural phytocenosis as an indicator of technogenic pollution of soils with heavy metals // Int. J. Phytoremediation. 2016. V. 18. No. 12. P. 1209–1220. doi: 10.1080/15226514.2016.1193469
16. Ковалёва Е.И., Трофимов С.Я., Шоба С.А. Реакция высших растений на уровень нефтезагрязнения почв в вегетационном опыте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2022. № 3. С. 74–84.
17. Халилова А.Ф. Устойчивость растений к углеводородному загрязнению на стадии прорастания // Проблемы агрохимии и экологии. 2012. № 2. С. 47–58.
18. Асадова Р.А., Исмаилов И.Т., Фарзалиева А.Г., Алиева А.А., Аллахвердиев Э.И. Получение стимуляторов роста растений на основе нефтяных кислот // Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 27. № 4. С. 927–934. doi: 10.33184/bulletin-bsu-2022.4.19
19. Скурлатов Ю.И., Вичутинская Е.В., Зайцева Н.И., Штамм Е.В., Швыдкий В.О., Семеняк Л.В., Байкова И.С. Формы и пути миграции и трансформации опасных химических веществ в окружающей среде // Химическая физика. 2017. Т. 36. № 7. С. 42–53. doi: 10.7868/S0207401X17070111
20. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802. doi: 10.7868/S0032180X13070125
21. Тюлькова Е.Г. Ингибирующий эффект летучих органических соединений на содержание фотосинтетических пигментов в листьях саженцев древесных растений // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2019. № 4. С. 36–44.
22. Петухова Г.А., Дмитриева В.В., Забродина В.В., Стрючкова Е.И., Ефрюгина О.А. Ответные реакции модельных тест-объектов на нефтяное загрязнение среды // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2017. Т. 3. № 1. С. 98–107. doi: 10.21684/2411-7927-2017-3-1-98-107
23. Корчагина Л.Е. Функциональные особенности растений верховых болот в условиях нефтяного загрязнения на территории Среднего Приобья // Вестник НВГУ. 2015. № 1. С. 14–21.
24. Шаяхметова Р.И., Мальгина С.П., Гут Т.М., Кулагин А.Ю. Изменение пигментного состава высших и хвойных растений на Самотлорском месторождении // Известия СамНЦ РАН. 2017. Т. 19. № 2 (2). С. 393–396.

References

1. Bani-hani E., Alkhatib F., Sedaghat A., Alkhazzam A., Al-Dousari F., Al-Saad O. An experimental study on producing a sustainable diesel-like fuel from waste engine oil // Renewable Energy Research and Application. 2020. V. 1. No. 2. P. 143–150. doi: 10.22044/rera.2020.9173.1020
2. Pelitli V., Doğan Ö., Köroğlu H.J. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes // Global Journal of Environmental Science and Management. 2017. V. 3. No. 1. P. 11–20. doi: 10.22034/gjesm.2017.03.01.002
3. Akateva T.G. The influence of oil pollution on the growth and development of *Phleum pratense*, *Festuca pratense*

- sis, *Phalaris canariensis* // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2021. No. 2 (54). P. 127–134 (in Russian). doi: 10.36906/2311-4444/21-2/17
4. Sorana O.Ț., Mihăilescu S., Strat D., Florentina G.I. Effects of oil pollution on seed germination and seedling emergence toxicity // Rom. Biotechnol. Lett. 2020. V. 25. No. 1. P. 1194–1201. doi: 10.25083/rbl/25.1/1194.1201
5. Stepanenko E.A., Volkova I.V., Alferova V.A., Sedjalieva L.K. Studying reaction of erect marigolds (*Tagetes erecta*) to oil pollution // Oil and gas technologies and environmental safety. 2023. No. 2. P. 83–88 (in Russian). doi: 10.24143/1812-9498-2023-2-83-88
6. Kurbatov Yu.N., Trifonova T.A. The study of the integral toxicity of oil-contaminated soil // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 141–150 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-141-150
7. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zainulgabidinov E.R., Ignatiev Yu.A. Development of one- and dicotyledic plants on reclaimed oil-contaminated alluvial turf soils // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2022. No. 1 (57). P. 91–101. (in Russian). doi: 10.36906/2311-4444/22-1/10
8. Ivanova N.A., Korchagina L.E. Features of leaves photosynthetic activity and pigment apparatus in the conditions of oil contamination in the Middle Ob // Estestvennyye nauki. 2012. No. 1 (38). P. 37–46 (in Russian).
9. Maslova T.G., Markovskaya E.F., Slemnev N.N. Functions of carotenoids in leaves of higher plants (an overview) // Zhurnal Obshchei Biologii. 2020. V. 81. No. 4. P. 297–310 (in Russian). doi: 10.31857/S0044459620040065
10. Hristin M.S., Lankin A.V., Kreslavskij V.D. Absorption of naphthalene by leaves and its interaction with chlorophyll-protein complexes of pea plants // Fiziologiya rasteniy. 2020. V. 67. No. 4. P. 400–407 (in Russian). doi: 10.31857/S0015330320040090
11. Walakulu Gamage S.S., Masakorala K., Brown M.T., Widana Gamage S.M.K. Tolerance of *Impatiens balsamina* L., and *Crotalaria retusa* L. to grow on soil contaminated by used lubricating oil: A comparative study // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2020. V. 188. Article No. 109911. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109911
12. Shlyk A.A. Determination of chlorophylls and carotenoids in green leaf extracts // Biochemical methods in plant physiology / Ed. O.A. Pavlinova. Moskva: Nauka, 1971. P. 154–170 (in Russian).
13. Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I., Kovach R.G., Koshovskii T.S., Khlynina N.I. Hydrocarbon status of soils under different ages of oil contamination // Pochvovedenie. 2016. No. 5. P. 574–583 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16050051
14. Zaushintsena A.V., Zaushintsen A.S., Maltseva A.T., Svirikova S.V., Tarasova I.V., Barysheva O.V. Vegetation degradation due to soil pollution with oil // Bulletin of Kemerovo State University. 2014. V. 2. No. 1 (57). P. 7–12 (in Russian).
15. Trifonova T.A., Alkhutova E.Y. Phytomass change in natural phytocenosis as an indicator of technogenic pollution of soils with heavy metals // Int. J. Phytoremediation. 2016. V. 18. No. 12. P. 1209–1220. doi: 10.1080/15226514.2016.1193469
16. Kovalyova E.I., Trofimov S.Ya., Shoba S.A. The reaction of higher plants to the oil contamination of soils in the pot experiment // Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science. 2022. No. 3. P. 74–84 (in Russian).
17. Halilova A.F. The tolerance of plants to soil pollution by hydrocarbons at early stages of growth // Agrochemistry and Ecology Problems. 2012. No. 2. P. 47–58 (in Russian).
18. Asadova R.A., Ismailov I.T., Farzaliyeva A.G., Aliyeva A.A., Allahverdiyev E.I. Synthesis of plant growth stimulants based on petroleum acids // Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2022. V. 27. No. 4. P. 927–934 (in Russian). doi: 10.33184/bulletin-bsu-2022.4.19
19. Skurlatov Yu.I., Vichutinskaya E.V., Zaitseva N.I., Shtamm E.V., Shvydkii V.O., Semenyak L.V., Baikova I.S. Forms and pathways of migration and transformation of hazardous chemicals in the environment // Khimicheskaya fizika. 2017. V. 36. No. 7. P. 42–53 (in Russian). doi: 107868/S0207401X17070111
20. Tsi bart A.S., Gennadiev A.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: sources, behavior, indication significance (a review) // Pochvovedenie. 2013. No. 7. P. 788–802 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X13070125
21. Tulkova E.G. Volatile organic compounds inhibiting effect on the photosynthetic pigments content in woody plant seedlings leaves // Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2019. No. 4. P. 36–44 (in Russian).
22. Petukhova G.A., Dmitrieva V.V., Zabrodina V.V., Stryuchkova E.I., Efyugina O.A. The response of model test objects to oil environmental pollution // Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology. 2017. V. 3. No. 1. P. 98–107 (in Russian). doi: 10.21684/2411-7927-2017-3-1-98-107
23. Korchagina L.E. Features of plants growing in upland bogs in the conditions oil pollution in the Middle Ob region // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2015. No. 1. P. 14–21 (in Russian).
24. Shayahmetova R.I., Malgina S.P., Gut T.M., Kulagin A.Yu. Change of pigmentary structure of the higher and coniferous plants at Samotlor field // Izvestia of RAS SamSC. 2017. V. 19. No. 2 (2). P. 393–396 (in Russian).

Эколого-токсикологическая оценка возможности применения селена для коррекции свинцовой интоксикации у крыс

© 2025. А. В. Синдирева¹, д. б. н., доцент, зав. кафедрой,
О. А. Зайко², к. мед. н., ст. преподаватель, А. К. Мангутова¹, ассистент,
¹Тюменский государственный университет,
625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6,
²Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
e-mail: sindireva72@mail.ru, oleg.zayko@bk.ru, annamangutova@gmail.com

В связи с загрязнением воды, почв, растений тяжёлыми металлами и, как следствие, избыточным поступлением этих элементов в рацион животных и человека с растительной пищей и водой, представляется актуальной разработка новых методов и изучение биохимических механизмов детоксикации в организме. Среди таких методов особое внимание заслуживает применение элементов-антагонистов, в частности, селена. Для оценки возможности применения селена для коррекции метаболических нарушений, развившихся в организме крыс линии Wistar под воздействием токсических доз свинца, был проведён подострый токсикологический эксперимент в течение 14 дней на крысах линии Wistar – половозрелых самцах. Эксперимент включал в себя 4 группы по 15 особей в каждой. Первая группа – интактные животные и опытные группы «Se», «Pb», «Pb+Se» с пероральным ежедневным введением соединений свинца и/или селена в дозе 1 мг/кг. После выведения животных из эксперимента и забора органов, методом индуктивно-связанной плазмы определяли содержание селена в них. В плазме крови определяли содержание веществ низкой и средней молекулярной массы, свидетельствующих о симптомах интоксикации, и биохимические показатели, характеризующие функциональное состояние печени и почек. Показатели перекисного окисления липидов и активность ферментов антиоксидантной активности определяли в гомогенатах печени и почек. Изменения функции печени и почек у животных групп «Se» и «Pb» связаны с нарушением энергетического обмена, развитием гипоксии и оксидативного стресса, приводящего к интенсификации процессов пероксидации и нарушению мембранных структур органов. Введение перорально крысам селенсодержащих препаратов на фоне соединений свинца способствует активизации антиоксидантной системы. Однако всё же отмечается как явление гипоксии, так и нарушение энергетического обмена. Об этом свидетельствует повышение уровня молочной кислоты, глюкозы. Кроме того, отмечается увеличение активности аспаратаминотрансферазы. Результаты исследования вносят вклад в понимание биохимических аспектов действия свинца и селена в организме животных. Полученные сведения могут послужить основой для разработки патогенетически обоснованных методов коррекции микроэлементозов, основанных на взаимовлиянии селена и тяжёлых металлов.

Ключевые слова: свинец, селен, печень, почки, микроэлементозы, метаболизм.

Ecological and toxicological evaluation of the possibility of selenium application for the correction of lead intoxication in Wistar rats

© 2025. A. V. Sindireva¹ ORCID: 0000-0001-8596-7584^{*}
O. A. Zayko² ORCID: 0000-0002-9324-3591^{*}
A. K. Mangutova¹ ORCID: 0000-0001-6489-2069^{*}
¹Tyumen State University,

6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003,

²Federal State Educational Institution of the Peoples' Friendship University of Russia,
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, Russia, 117198,

e-mail: sindireva72@mail.ru, oleg.zayko@bk.ru, annamangutova@gmail.com

Excessive intake of heavy metals (HM) into the diet of animals and humans with plant food and water is due to water, soil, and plants contamination with HM. In this regard, it seems relevant to develop new methods and study of biochemical mechanisms of detoxification in the body. The use of antagonist elements, in particular selenium, deserves special attention. To assess the possibility of selenium application for correction of metabolic disorders caused by toxic doses of lead in the body, a subacute experiment was conducted for 14 days on male Wistar rats. The animals were divided

into four groups of 15 rats each. The first group was the control (intact animals). The experimental groups "Se", "Pb", "Pb+Se" received daily oral administration of 1 mg/kg lead or/and selenium compounds. After the experiment, the organs of the animals were examined for selenium content using a fluorometric method. The blood plasma was examined for the content of biochemical indicators characterizing liver and kidney function, as well as the content of substances with low and medium molecular weight. The activity of antioxidant enzymes and indicators of lipid peroxidation were determined in the liver and kidney homogenates. Our results showed that changes in liver and kidney function in the "Se" and "Pb" groups were associated with impaired energy metabolism, hypoxia, and oxidative stress, leading to intensified peroxidation processes and disruption of organ membrane structures. The administration of selenium-containing compounds on the background of lead compounds promotes activation of the antioxidant system. However, both hypoxia and impaired energy metabolism are still observed, as evidenced by increased levels of lactate, glucose, and aspartate aminotransferase activity. The results contribute to understanding the biochemical aspects of lead and selenium action in animals. The obtained data can serve as a basis for developing pathogenetically justified methods for correcting micronutrient imbalances based on the interaction between selenium and HM.

Keywords: lead, selenium, liver, kidneys, trace elemental diseases, metabolism.

В связи с загрязнением водных объектов, почв, растений тяжёлыми металлами (ТМ) и, как следствие, избыточным поступлением этих элементов в рацион животных и человека с растительной пищей и водой представляется актуальной разработка новых методов и изучение биохимических механизмов детоксикации в организме.

Одним из наиболее токсичных элементов является свинец, оказывающий многоплановое токсичное влияние на живые организмы. Поскольку свинец, как и другие ТМ, является кумулятивным ядом, проблема снижения его аккумуляции в организме требует глубокого изучения [1, 2].

Поиск научно обоснованных факторов снижения токсичности ТМ сопряжён с рядом проблем. Несмотря на разносторонние работы, имеющиеся в этой области, применяемые способы детоксикации имеют свои минусы, что объясняется недостатком знаний о молекулярных механизмах их действия. Поэтому актуально изучение биохимических основ методов снижения негативного действия экотоксикантов [3]. Среди таких методов особое внимание заслуживает применение элементов-антагонистов ТМ [4]. Примером антагониста ряда ТМ может быть селен [5]. В организме животных и человека селен выполняет роль антиоксиданта, предотвращает развитие оксидативного стресса, входит в состав более 30 белков, является синергистом ряда микроэлементов и витаминов [6, 7]. Его дефицит сопряжён с развитием канцерогенеза, болезней сердечно-сосудистой системы, нарушением обмена тиреоидных гормонов, активности биотрансформирующих ферментов [8, 9]. Селен рассматривается как эссенциальный элемент [10].

Однако применение селена в терапевтических целях должно осуществляться под строгим медицинским контролем, т. к. этот микроэлемент имеет узкую грань между ток-

сичностью и необходимостью. В токсических дозах селен вызывает патологические изменения некоторых внутренних органов. Токсикометрические характеристики соединений селена для человека мало изучены. Ряд авторов считает, что основная причина токсического действия селена – проявление антагонизма с серой, и, соответственно, замещение сульфидных групп селенгидрильными, что изменяет направленность работы ряда ферментов и приводит к дисфункции клеток, а затем органов и тканей [11, 12]. Также в исследованиях с токсичными концентрациями селена отмечается его прооксидантное действие.

В связи с этим, наряду с эссенциальностью этого элемента, большую озабоченность вызывает и наметившаяся в последние десятилетия тенденция к обогащению селеном пищевых продуктов, обусловленная развившимся в некоторых местностях дефицитом этого микроэлемента в живых организмах, связанным с его природным недостатком в объектах окружающей среды [13].

Таким образом, возникает необходимость изучения механизмов действия и взаимного влияния ТМ и селена для разработки рекомендаций по диагностике и выявлению эффектов применения препаратов селена для коррекции микроэлементозов.

Цель исследования: оценка возможности применения селена для коррекции метаболических нарушений в организме крыс линии Wistar, вызванных повышенными дозами свинца.

Материалы и методы исследования

С целью реализации задач работы был проведён подострый эксперимент. Объекты исследования: крысы-самцы линии Wistar. Было сформировано четыре группы – контрольная и три опытных. Схема опыта представлена в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Распределение лабораторных животных согласно вариантам опыта
Distribution of laboratory animals according to experiment variants

Группа животных A group of animals	Особенности корма Feed features	Количество животных, голов Number of animals, heads
Контрольная Control	основной рацион (ОР) + корма контрольного варианта Basic diet (BD) + feed of the control variant	15
1 опытная «Pb» 1 experimental "Pb"	ОР + свинец в дозе 1 мг/кг (в виде раствора ацетата свинца) BD + 1 mg/kg lead (in the form of lead acetate solution)	15
2 опытная «Se» 2 experimental "Se"	ОР + селен в дозе 1 мг/кг (в виде раствора селенита натрия) BD + 1 mg/kg selenium (in the form of sodium selenite solution)	15
3 опытная «Pb+ Se» 3 experimental "Pb+ Se"	ОР + селен + свинец (оба – по 1 мг/кг) BD + selenium + lead (both at 1 mg/kg)	15

Первая группа – контрольная, животные содержались на обычном рационе. В рацион животных первой опытной группы перорально вводили ежедневно свинец в составе раствора ацетата свинца, животные второй группы ежедневно получали селен в составе раствора селенита натрия, в рацион животных третьей опытной группы добавляли совместно соединения свинца и селена в соотношении 1:1. Дозы свинца и селена рассчитаны на основе предыдущих исследований авторов [14] и составляли по 1 мг/кг. При проведении эксперимента были использованы «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур» (ГОСТ 33215-2014) и «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами» (ГОСТ 33216-2014) с учётом основных положений международного документа ETS № 123 «Приложение А к Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых в экспериментах и в других научных целях».

По окончании опыта животных выводили из эксперимента под эфирным наркозом с последующим забором крови из бедренной артерии и органов – печени и почек согласно методике вскрытия и извлечения органов лабораторных животных, представленной в работе [15]. В плазме крови определяли биохимические показатели, характеризующие функциональность и работу печени и почек: общий белок и его фракции (альбумины и глобулины), глюкоза, общий билирубин, холестерин, креатинин, молочная и мочевая кислоты, мочевины, актив-

ность ферментов аланинаминотрансферазы (АЛТ), аспаратаминотрансферазы (АСТ). По методу, описанному в работе [16], определяли содержание веществ низкой и средней молекулярной массы (ВНСММ), являющихся общепринятыми показателями синдрома интоксикации. В гомогенатах печени и почек определяли активность следующих веществ: супероксиддисмутаза (СОД), каталазы, глутатионпероксидазы (ГлПО), глутатионредуктазы (ГлР), глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы (Г-6-Ф ДГ), содержание глутатиона (G-SH) и малонового диальдегида (МДА). По методу, описанному в работе [17], готовили липидный экстракт и в нём определяли содержание диеновых конъюгатов (ДК) и липофусциноподобного пигмента (ЛФПП). Методом индуктивно-связанной плазмы определяли содержание селена в органах.

Обработку полученных данных проводили при помощи методов вариационной статистики с применением статистического пакета STATISTICA. Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (*p*), при этом за критический уровень значимости принимали $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Установлено распределение селена по органам на фоне повышенного поступления селена и свинца, а также их совместного действия (рис.).

Наши исследования показали, что наибольшее количество селена отмечается у животных группы «Se». В зависимости от физиологических особенностей органов, содержание Se увеличивается от 87,8 до 151,2%

по сравнению с контролем. Введение в рацион свинца значительно снижает по сравнению с контролем уровень селена в органах – на 4,54–48,7%. Взаимодействие свинца и селена изменяло уровень накопления микроэлемента: по сравнению с контролем способствовало увеличению содержания селена в печени и почках на 87,8–106,6%. Необходимо отметить, что в условиях обогащения рациона селеном наиболее интенсивно этот микроэлемент накапливался в печени. Однако самое большое количество селена в условиях эксперимента отмечено в почках: 11348 ± 675 мкг/кг (группа «Se»). Сопоставление полученных сведений с биохимическими показателями позволило установить оптимальные и критические уровни содержания селена в органах животных.

Поскольку основным депо селена являются печень и почки, нами проведена оценка биохимических показателей, характеризующих функции этих органов и сопряжённых с патологическими изменениями показателей энергетического обмена. Установлен интегральный показатель общей интоксикации организма – уровень ВНСММ (табл. 2).

Исследования показали, что белоксинтезирующая функция печени животных в группах «Se», «Pb» и «Se+Pb» не нарушена, так как достоверно значимые различия по содержанию общего белка и его фракций между контрольной группой и опытными не установлены.

В группах «Se» и «Pb» у животных наблюдалась повышенная активность аминотрансфераз, что свидетельствует о повреждениях клеток печени. Ферментная активность АСТ увеличивалась в сравнении с уровнем контроля у животных групп «Se» и «Pb» соответственно на 115,5 и 28,6%, АЛТ – соответственно на 87,8 и 78,5%. У животных группы «Pb+Se» отмечается достоверное превышение активности АСТ на 45,1% по сравнению с контролем, АЛТ – тенденция к увеличению (на 21,8%).

В условиях эксперимента отмечалось повышение уровня холестерина на 28,3% (группа «Se») и 33,3% (группа «Pb») по сравнению с интактными животными. У животных группы «Pb+Se» изменения по содержанию холестерина в крови по сравнению с контролем достоверно не значимы.

В группах «Se» и «Pb» наблюдалось увеличение показателей глюкозы, мочевой и молочной кислот по сравнению с этими же показателями в контрольной группе на 65,5; 71,3 и 90,7% соответственно для опытной группы «Se» и на 101,4; 116,2 и 170,4% для опытной группы «Pb». Изменение этих биохимических показателей у животных опытных групп «Pb» и «Se» свидетельствует о нарушении обменных процессов организма, в частности, наличия явлений гипоксии, нарушения энергетического обмена. В то же время, у животных группы «Pb+Se» достоверно изменяется только уровень глюкозы и молочной кислоты и отме-

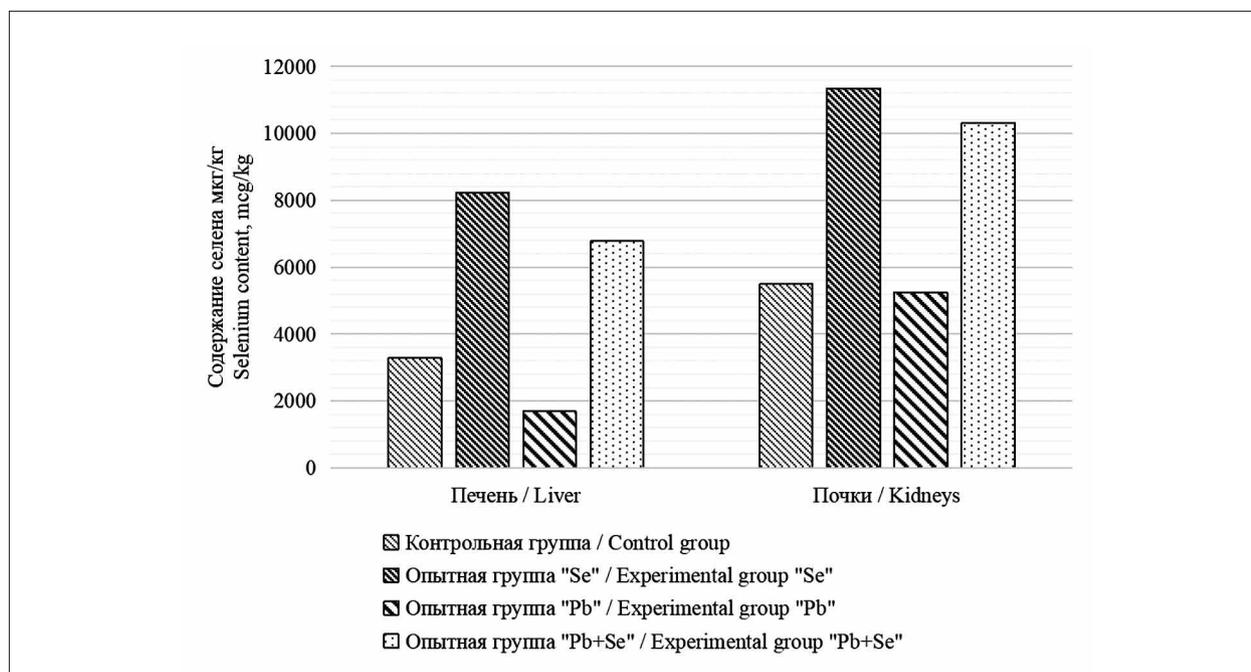


Рис. Содержание селена в печени и почках крыс, мкг/кг
 Fig. Selenium content (µg/kg) in the liver and kidneys of rats

чается лишь тенденция к изменению уровня мочевины и мочевой кислоты.

Свидетельством изменения функции почек является повышение уровня не только мочевины и мочевой кислоты, но и уровня креатинина у животных в группах «Se» и «Pb» соответственно на 31,3 и 26,8% по сравнению с контролем. Необходимо отметить, что в группе животных «Pb+Se» данный показатель не имеет достоверно значимых различий.

Одним из важных интегральных показателей нарушения метаболизма и следствием развившейся интоксикации является уровень в плазме крови животных ВНСММ. Интерес-

но отметить, что введение селена и свинца по отдельности достоверно способствует увеличению уровня ВНСММ соответственно на 72,8 и 85% по сравнению с контролем. При одновременном введении Pb и Se содержание ВНСММ превышает уровень контроля на 34%.

Из полученных данных следует, что в крови крыс группы «Pb» отмечается снижение содержания эритроцитов и гемоглобина по сравнению с интактными животными (табл. 2).

Известно, что нарушение энергетического обмена, развитие интоксикации сопряжено с оксидативными процессами в организме [18].

Таблица 2 / Table2

Биохимические показатели плазмы крови крыс контрольной и опытных групп
Biochemical parameters of rat blood plasma in control and experimental groups

Показатели Indicators	Группа животных, $\bar{X} \pm S_d$, n=15 A group of animals, $\bar{X} \pm S_d$, n=15			
	Контроль / Control	Se	Pb	Pb+Se
Общий белок, г/л Total protein, g/L	62,1±1,6	62,6±3,6	68,8±2,7	63,4±3,7
Глобулины, г/л Globulins, g/L	28,6±1,8	23,2±2,5	30,1±2,8	28,3±2,4
Альбумины, г/л Albumins, g/L	33,5±3,0	39,4±2,7	38,7±3,5	35,1±3,8
Альбумины/глобулины, абс. ед. Albumins/Globulins, abs. unit.	1,17±0,19	1,70±0,22	1,27±0,29	1,24±0,15
Глюкоза, ммоль/л Glucose, mmol/L	4,2±0,7	6,9±0,15*	8,4±0,6*	6,4±0,6*
АсАт, МЕ/л AsAt, ME/L	137±11	294±13*	176±10*	198±12*
АлАт, МЕ/л AlAt, ME/L	44±4	83±6*	79±5*	54±5
Холестерин, ммоль/л Cholesterol, mmol/L	2,40±0,22	3,08±0,19*	3,20±0,11*	2,68±0,18
Молочная кислота, ммоль/л Lactic acid, mmol/L	2,7±0,14	5,15±0,23*	7,5±0,17*	6,0±0,22*
Мочевая кислота, мкмоль/л Uric acid, mmol/L	121±14	208±5*	263±8*	139±12
Мочевина, ммоль/л Urea, mmol/L	6,7±0,14	7,7±0,29*	7,2±0,15*	4,9±0,5
Креатинин, мкмоль/л Creatinine, μmol/L	45,1±1,2	59±5*	57,2±2,4*	50±5
Эритроциты, млн/мкл Erythrocytes, million/μL	5,02±0,11	4,4±0,5	4,22±0,14*	4,8±0,4
Гемоглобин, г/л эритроцит. Hemoglobin, g/L erythrocytes	217±2,5	220±2,4	201±3,6*	220±5
ВНСММ, усл. ед. SLMMW, conl. units	4,12±0,5	7,12±0,4*	7,62±0,5*	5,5±0,7

Примечание: * – достоверность различий по сравнению с контролем ($p < 0,05$); ВНСММ – вещества низкой и средней молекулярной массы.

Note: * – significance of differences compared to control ($p < 0,05$); SLMMW – substances with low and medium molecular weight.

Таблица 3 / Table 3

Показатели антиоксидантной активности и перекисного окисления липидов в печени и почках крыс контрольной и опытных групп
Indicators of antioxidant activity and lipid peroxidation in the rats' liver and kidneys in control and experimental groups

Показатели Indicators	Группа животных, $\bar{X} \pm S_d$, n=15 A group of animals, $\bar{X} \pm S_d$, n=15			
	Контроль Control	Pb+Se	Pb	Se
Супероксиддисмутаза, ед./мг белка Superoxide dismutase, units/mg of protein	<u>21,5±2,24</u> 17,0±0,90	<u>26,9±2,7</u> 18,7±0,8	<u>14,8±2,2*</u> 11,3±0,8*	<u>25,5±3,19</u> 17,0±0,96
Каталаза, ед./мг белка·мин Catalase, units/mg of protein·min	<u>10,5±0,93</u> 8,55±0,72	<u>12,6±0,9</u> 9,43±0,72	<u>9,56±0,8</u> 7,99±0,9	<u>11,6±0,51</u> 8,63±0,57
Диеновые конъюгаты, мэкв./мг липидов Diene conjugates, meq/mg of lipids	<u>0,35±0,03</u> 0,25±0,03	<u>0,34±0,03</u> 0,25±0,04	<u>0,42±0,02*</u> 0,32±0,02*	<u>0,47±0,052*</u> 0,29±0,01*
Малоновый диальдегид, ед. оптич. плотн./мг белка Malondialdehyde, units of optical density/mg of protein	<u>0,21±0,04</u> 0,25±0,04	<u>0,19±0,03</u> 0,25±0,05	<u>0,36±0,07*</u> 0,41±0,02*	<u>0,27±0,02*</u> 0,28±0,03
Липофусциноподобный пигмент, ед. флуор./мг липидов Lipofuscin-like pigment, units of fluorescence/mg of lipids	<u>8,25±0,59</u> 7,52±0,65	<u>8,25±0,59</u> 7,56±0,48	<u>9,90±0,54*</u> 8,65±0,43*	<u>11,9±1,69*</u> 10,6±1,20*
Глутатионпероксидаза, МЕ/мг белка Glutathione peroxidase, IU/mg of protein	<u>8,55±0,91</u> 2,65±0,21	<u>9,37±0,91</u> 2,92±0,25	<u>7,68±0,6*</u> 2,45±0,18	<u>5,15±0,59*</u> 3,19±0,30*
Глутатион, мкмоль/мг белка Glutathione, μmol/mg of protein	<u>455±31,3</u> 428±27	<u>503±31</u> 471±16	<u>363±34*</u> 282±23*	<u>407±19,5*</u> 464±25
Глутатионредуктаза, мкмоль/(мг белка·мин) Glutathione reductase, μmol/(mg protein·min)	<u>2,55±0,28</u> 1,75±0,37	<u>3,07±0,29</u> 2,14±0,40	<u>1,66±0,24*</u> 1,28±0,17	<u>2,04±0,11*</u> 1,45±0,08*
Глюкозо-6-фосфат дегидрогеназа, мкмоль/мг белка·мин Glucose-6-phosphate dehydrogenase, μmol/mg protein·min	<u>15,5±2,83</u> 5,85±0,55	<u>15,3±2,8</u> 5,81±0,32	<u>11,2±1,6*</u> 4,45±0,25*	<u>14,3±0,79</u> 5,67±0,40

Примечание: над чертой – в печени, под чертой – в почках; * – достоверность различий по сравнению с контролем (p<0,05).

Note: above the line – in the liver, under the line – in the kidneys; * – significance of differences compared to control (p<0.05).

Изменение показателей, характеризующих состояние окислительных процессов в тканях животных при введении в рацион кормов с применением селена и свинца в дозе 1 мг/кг, представлено в таблице 3.

Данные, представленные в таблице 3, свидетельствуют как об изменении активности enzymатических процессов, связанных с антиоксидантной защитой, так и продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), как отклика на активизацию окислительного стресса. Установлено, что активность СОД у животных группы «Pb» снижена в печени, почках соответственно на 31,2; 33,5%, а каталазы – соответственно на 8,95; 6,5% по сравнению с аналогичными показателями у крыс контрольной группы. Известно, что данные ферменты отвечают за каталитическое удаление активных форм кислорода [19] и снижение их активности свидетельствует об

угнетении антиоксидантной активности в печени и почках. Активизация продуцирования кислородных радикалов приводит к увеличению диеновых конъюгатов, МДА, липофусциноподобного пигмента, т. е. продуктов перекисного окисления в печени на 20,0; 71,4; 20,0%, почках – на 28,0; 64,0; 15,0% по сравнению с показателями у крыс контрольной группы.

Определённый вклад в усиление процессов ПОЛ вносит также снижение активности ГлПО, участвующей в разрушении уже образовавшихся перекисей, в печени на 10,2%, почках – на 7,5%. Уменьшение активности этого фермента связано со снижением содержания глутатиона. В клетках печени, почках крыс группы «Pb» отмечается снижение трипептида соответственно на 20,2; 34,1%, одновременно с этим активность ГлР в печени, почках крыс группы «Pb» уменьшилась соответственно на 34,9 и 26,9%.

Функционированию фермента ГлПО *in vivo* препятствует недостаточно эффективная генерация реакциями пентозного цикла НАДФН₂, вызванная торможением активности Г-6-Ф ДГ в печени на 27,7 и в почках – на 23,9%.

Согласно данным таблицы 2, у крыс группы «Se» отмечена лишь тенденция к снижению уровня эритроцитов в крови (на 13,1% по сравнению с контролем), содержание гемоглобина достоверно не изменяется по сравнению с контролем. Можно предположить, что у данных животных не отмечаются признаки гемической гипоксии.

Несмотря на увеличение активности СОД и каталазы под влиянием селена, отмечается и угнетающее действие повышенных его доз, что выражается в снижении эффективности системы антиперекисной защиты в целом. Об этом свидетельствует повышение содержания метаболитов ПОЛ: диеновых конъюгат на 34,3%, МДА на 28,6%, липофусциноподобного пигмента на 44,2% в печени и в почках соответственно на 16,0; 12,0; 41,0%. В органах активность ГлПО изменяется по-разному: в печени она снижена по сравнению с контролем (39,8%), а в почках увеличивается соответственно на 20,4%. Содержание глутатиона в печени незначительно снижается – на 10,5%, а в почках незначительно увеличивается – на 8,5%.

Функционирование ГлР в печени и почках уменьшено соответственно на 20,0 и 17,1% по сравнению с интактными животными. Это сопряжено с торможением активности Г-6-Ф ДГ, поставляющей глутатионредуктазе НАДФН₂.

Введение в рацион животных одновременно соединений селена и свинца не приводит к усилению гипоксии, о чём свидетельствует отсутствие изменения по сравнению с контролем уровня эритроцитов и гемоглобина в крови крыс. Более того, селен на фоне свинца предотвращает увеличение показателей ПОЛ в органах и даже имеет тенденцию к их снижению. Наблюдалось увеличение активности ферментов антиоксидантной защиты: СОД и ГлПО в печени на 25,1 и 9,6%, в почках на 10,0 и 10,2% соответственно по сравнению с этими же показателями в органах у интактных животных. Отмечена тенденция к увеличению уровня глутатиона в печени и почках на 10,5 и 10,0% соответственно по сравнению с контролем. Эффективность восстановления глутатиондисульфида в результате глутатионпероксидазной реакции не отмечается, об этом свидетельствует снижение активности

ГлР в печени и почках на 20,4 и 22,3% соответственно по сравнению с контролем. Тенденция к снижению активности глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы отмечается в печени и почках, что свидетельствует о торможении активности энзима.

Заключение

У крыс линии Wistar при ежедневном пероральном введении соединений как селена, так и свинца отмечается изменение биохимических показателей, характеризующих функции печени и почек. Нарушение метаболизма у животных групп «Se» и «Pb» связано с развитием интоксикации организма, изменением энергетического обмена, развитием гемической и тканевой гипоксии, оксидативного стресса, приводящего к усилению процессов пероксидации и разрушению мембранных структур органов. Наиболее выражены процессы интоксикации у животных группы «Pb».

Селен в дозе 1 мг/кг оказал негативное воздействие на организм крыс. Содержание селена в печени и почках в среднем 8–11 мг/кг оказывает гепатотоксическое, нефротоксическое действие. Свободнорадикальные реакции, протекающие в органах животных, сопряжены с процессами интоксикации, о чём свидетельствует усиленное образование веществ низкой и средней молекулярной массы при введении в организм селена.

Введение селеносодержащих соединений на фоне свинца приводит к стимуляции антиоксидантных систем. Однако, всё же наблюдается как явление гипоксии, так и нарушение энергетического обмена. Об этом свидетельствует повышение уровня в плазме крови животных группы «Pb+Se» молочной кислоты, глюкозы и увеличение активности фермента аспаратаминотрансферазы.

Применение селена возможно для детоксикации организма при отравлении свинцом. Однако введение этого микроэлемента в рацион животных в повышенных количествах в дозе 1 мг/кг может способствовать нарушению процессов метаболизма, функциональным преобразованиям органов – аккумуляторов микроэлемента (печени и почек), напряжённости свободнорадикальных процессов.

Таким образом, результаты исследования вносят определённый вклад в понимание молекулярных механизмов действия свинца и селена в организме животных (крыс линии Wistar). Изучены особенности аккумуляции

селена в органах – депо микроэлемента – печени и почках при применении селена, свинца, как по отдельности, так и совместно. Доказано, что дозы свинца и селена, соответствующие 1 мг/кг, являются токсичными для организма животных, что показано в работе на модели крыс линии Wistar. Свидетельством негативного воздействия соединений свинца и селена на организм животных является достоверное увеличение интегрального показателя общей интоксикации организма – уровня веществ низкой и средней молекулярной массы. Установленные молекулярные механизмы воздействия на организм животных селена и свинца по отдельности и совместно служат основой для внедрения новых методов оценки интоксикации данными элементами, а также диагностики эффективности применяемых методов детоксикации тяжёлых металлов при помощи селена.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44028.

Литература

1. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. Биогеохимическая индикация микроэлементов / Отв. ред. Т.И. Моисеенко. М.: РАН, 2018. 386 с.
2. Шестова Г.В., Ливанов Г.А., Остапенко Ю.Н., Иванова Т.М., Сизова К.В. Опасность хронических отравлений свинцом для здоровья населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2012. № 4 (42). С. 65–76.
3. Морковкин Г.Г., Панова Е.В. Влияние поступления химических элементов в организм человека с суточным рационом питания на заболеваемость сельских жителей Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2005. № 3 (19). С. 17–26.
4. Голубкина Н.А., Папазян Т.Т. Селен в питании: растения, животные, человек. М.: Печатный город, 2006. 254 с.
5. Arthur J.R., Nicol F., Beckett G.J. Selenium deficiency, thyroid hormone metabolism, and thyroid hormone deiodinases // Am. J. Clin. Nutr. 1993. V. 57. Suppl. 2. P. 236S–239S. doi: 10.1093/ajcn/57.2.236S
6. Liu C., Yan Q., Gao C., Lin L., Wei J. Study on antioxidant effect of recombinant glutathione peroxidase 1 // Int. J. Biol. Macromol. 2021. V. 170. P. 503–513. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.183
7. Whiting R.F., Wei L., Stich H.F. Unscheduled DNA synthesis and chromosome aberration induced by inorganic and organic selenium compounds in the presence of glutathione // Mutat. Res. 1980. V. 78. No. 2. P. 159–169. doi: 10.1016/0165-1218(80)90095-6
8. Lin Y., He F., Lian S., Xie B., Liu T., He J., Liu C. Selenium status in patients with chronic liver disease: A systematic review and meta-analysis // Nutrients. 2022. V. 14. No. 5. Article No. 952. doi: 10.3390/nu14050952
9. Wang X., Li H., Yang L., Kong C., Wang J., Li Y. Selenium nutritional status of rural residents and its correlation with dietary intake patterns in a typical low-selenium area in China // Nutrients. 2020. V. 12. No. 12. Article No. 3816. doi: 10.3390/nu12123816
10. Mojadadi A., Au A., Salah W., Witting P., Ahmad G. Role for selenium in metabolic homeostasis and human reproduction // Nutrients. 2021. V. 13. No. 9. Article No. 3256. doi: 10.3390/nu13093256
11. Zhang F., Li X., Wei Y. Selenium and selenoproteins in health // Biomolecules. 2023. V. 13. No. 5. Article No. 799. doi: 10.3390/biom13050799
12. Дубинина Е.Е., Туркин В.В., Бабенко Г.А., Исаков В.А. Выделение и свойства супероксиддисмутазы плазмы крови человека // Биохимия. 1992. Т. 57. № 12. С. 1892–1900.
13. Hossain A., Skalicky M., Brestic M., Maitra S., Sarkar S., Ahmad Z., Vemuri H., Garai S., Mondal M., Bhatt R., Kumar P., Banerjee P., Saha S., Islam T., Laling A.M. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects // Molecules. 2021. V. 26. No. 4. Article No. 881. doi: 10.3390/molecules26040881
14. Синдирева А.В., Майданюк Г.А., Голубкина Н.А. Влияние селена на содержание микроэлементов в печени крыс линии Wistar // Вестник НВГУ. 2018. № 3. С. 103–110.
15. Коптяева К.Е., Мужикян А.А., Гуцин Я.А., Беляева Е.В., Макарова М.Н., Макаров В.Г. Методика вскрытия и извлечения органов лабораторных животных (крысы) // Лабораторные животные для научных исследований. 2018. № 2. С. 71–92. doi: 10.29296/2618723X-2018-02-08
16. Малахова М.Я., Зубаткина О.В., Совершаева С.Л. Эндогенная интоксикация как отражение компенсаторной перестройки обменных процессов в организме // Эфферентная терапия. 2000. Т. 6. № 4. С. 3–14.
17. Волчегорский И.А., Долгушин И.И., Колесников О.Л., Цейликман В.Э. Экспериментальное моделирование и лабораторная оценка адаптивных реакций организма. Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2000. 167 с.
18. Синдирева А.В., Зайко О.А. Влияние повышенного содержания селена в почве на накопление его в рапсе яровом и состоянии антиоксидантной активности в печени крыс // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 3. С. 45–47.
19. Головки Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 17–26. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

References

1. Ermakov V.V., Tyutikov S.F., Safonov V.A. Bio-geochemical indication of microelementoses / Ed. T.I. Moiseenko. Moskva: RAS, 2018. 386 p. (in Russian).
2. Shestova G.V., Livanov G.A., Ostapenko Yu.N., Ivanova T.M., Sizova K.V. Danger of chronic poisoning by lead for health of people // *Meditsina ekstremalnykh situatsiy*. 2012. No. 4 (42). P. 65–76 (in Russian).
3. Morkovkin G.G., Panova E.V. The effect of chemical elements intake into the human body with daily diet on the morbidity of rural residents of the Altai Krai // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2005. No. 3 (19). P. 17–26 (in Russian).
4. Golubkina N.A., Papazyan T.T. Selenium in nutrition: plants, animals, man. Moskva: Pechatnyy gorod, 2006. 254 p. (in Russian).
5. Arthur J.R., Nicol F., Beckett G.J. Selenium deficiency, thyroid hormone metabolism, and thyroid hormone deiodinases // *Am. J. Clin. Nutr.* 1993. V. 57. Suppl. 2. P. 236S–239S. doi: 10.1093/ajcn/57.2.236S
6. Liu C., Yan Q., Gao C., Lin L., Wei J. Study on antioxidant effect of recombinant glutathione peroxidase 1. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2021. V. 170. P. 503–513. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.183
7. Whiting R.F., Wei L., Stich H.F. Unscheduled DNA synthesis and chromosome aberration induced by inorganic and organic selenium compounds in the presence of glutathione // *Mutat. Res.* 1980. V. 78. No. 2. P. 159–169. doi: 10.1016/0165-1218(80)90095-6
8. Lin Y., He F., Lian S., Xie B., Liu T., He J., Liu C. Selenium status in patients with chronic liver disease: A systematic review and meta-analysis // *Nutrients*. 2022. V. 14. No. 5. Article No. 952. doi: 10.3390/nu14050952
9. Wang X., Li H., Yang L., Kong C., Wang J., Li Y. Selenium nutritional status of rural residents and its correlation with dietary intake patterns in a typical low-selenium area in China // *Nutrients*. 2020. V. 12. No. 12. Article No. 3816. doi: 10.3390/nu12123816
10. Mojadadi A., Au A., Salah W., Witting P., Ahmad G. Role for selenium in metabolic homeostasis and human reproduction // *Nutrients*. 2021. V. 13. No. 9. Article No. 3256. doi: 10.3390/nu13093256
11. Zhang F., Li X., Wei Y. Selenium and selenoproteins in health // *Biomolecules*. 2023. V. 13. No. 5. Article No. 799. doi: 10.3390/biom13050799
12. Dubinina E.E., Turkin V.V., Babenko G.A., Isakov V.A. Isolation and properties of human blood plasma superoxide dismutase // *Biokhimiya*. 1992. V. 57. No. 12. P. 1892–1900 (in Russian).
13. Hossain A., Skalicky M., Brestic M., Maitra S., Sarkar S., Ahmad Z., Vemuri H., Garai S., Mondal M., Bhatt R., Kumar P., Banerjee P., Saha S., Islam T., Laing A.M. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects // *Molecules*. 2021. V. 26. No. 4. Article No. 881. doi: 10.3390/molecules26040881
14. Sindireva A.V., Maydanyuk G.A., Golubkina N.A. Influence of selenium on the content of microelements in the liver of Wistar rats // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2018. No. 3. P. 103–110 (in Russian).
15. Koptyaeva K.E., Muzhikyan A.A., Gushchin Ya.A., Belyaeva E.V., Makarova M.N., Makarov V.G. Technique of dissection and extracting organs of laboratory animals. Message 1 (rats). // *Laboratory Animals for Science*. 2018. No. 2. P. 71–92. doi: 10.29296/2618723X-2018-02-08
16. Malakhova M.Ya., Zubatkina O.V., Sovershaeva S.L. Endogenous intoxication as a reflection of compensatory restructuring of metabolic processes in the body // *Efferentnaya terapiya*. 2000. V. 6. No. 4. P. 3–14 (in Russian).
17. Volchegorsky I.A., Dolgushin I.I., Kolesnikov O.L., Tseilikman V.E. Experimental modeling and laboratory evaluation of adaptive reactions of the organism. Chelyabinsk: Izdatelstvo ChGPU, 2000. 167 p. (in Russian).
18. Sindireva A.V., Zajko O.A. Influence increased content of selenium in soil on accumulation in rape spring and antioxidant activity in liver of rats // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2009. No. 3. P. 45–47 (in Russian).
19. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrating overview // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

Структура населения булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera, Papilionoidea) луговых местообитаний подзоны южной тайги

© 2025. А. В. Мазеева, член Коми отделения Русского энтомологического общества, А. Г. Татаринов, д. б. н., в. н. с., О. И. Кулакова, к. б. н., с. н. с., Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28, e-mail: mазеева@yandex.ru, tatarinov.a@ib.komisc.ru, kulakova@ib.komisc.ru

В статье рассматривается структура населения булавоусых чешуекрылых на основе соотношения численности имаго разных видов в луговых топических группировках южной тайги Кировской области. На обследованных 16 лугах было отмечено 65 видов булавоусых чешуекрылых, что составляет 56% всех представителей надсемейства в фауне южной тайги Кировской области. На основе учётов численности имаго на трансектах выделены три основных типа топических группировок, отличающихся составом фоновых видов. Выявлен состав фоновых видов булавоусых чешуекрылых на исследованных лугах. Сделан вывод об устойчивой связи структуры населения булавоусых чешуекрылых с растительным покровом. Также были выявлены внешние факторы, влияющие на эту зависимость. Показана роль муравейников в формировании структуры населения булавоусых чешуекрылых луговых местообитаний, определяющая облик топических группировок Papilionoidea на исследуемой территории.

Ключевые слова: Papilionoidea, Кировская область, южная тайга, структура населения луга, топические группировки видов.

The butterfly (Lepidoptera, Rhopalocera) abundance of meadow ecosystems in the southern taiga

© 2025. A. V. Mazeeva ORCID: 0000-0003-1061-7381

A. G. Tatarinov ORCID: 0000-0002-9990-395X

O. I. Kulakova ORCID: 0000-0002-9926-1141

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982, e-mail: mазеева@yandex.ru, tatarinov.a@ib.komisc.ru, kulakova@ib.komisc.ru

The article considered the structure of butterfly abundance, based on the ratio of the butterfly adults number in the meadow ecosystems in the Kirov Region southern taiga. 65 butterfly species (56% Papilionoidea species of Kirov region's southern taiga) were recorded in the 16 meadows. The composition of the background butterfly species of the studied meadows was identified from regular transects counts over several years from May to August inclusive (Pollard walk). In the remaining meadows the background species consisted of two to four species in different combinations. Three main types topical groups were identified on the results of analysing background species combinations, percentages, and estimates of their relative abundance on a logarithmic scale. They were conventionally designated according to the main background species: type *idas/argus*, type *lineola*, and type *hyperantus*. In addition two "intermediate" groups were established. The first one is jointly dominated by *Aphantopus hyperantus* and *Thymelicus lineola*, while the second one presents three subdominants – *Plebeius idas/argus*, *Pieris napi*, and *Th. lineola* – without a clear leader in abundance. A stable relationship between the butterfly abundance structure and vegetation cover was noted. We also identified external factors affecting this dependence. This paper shows the role of ant nests in the formation of the butterfly abundance structure in meadow habitats, that determines the Papilionoidea topical groups' existence in the studied area. A high number of ant nests in the sites increases the *P. idas/argus* relative abundance. This relationship is confirmed by one-way ANOVA and correlation analysis.

Keywords: Papilionoidea, Kirov Region, southern taiga, abundance of meadow ecosystems, topical groups of species.

Булавоусые чешуекрылые (Lepidoptera, Papilionoidea) – относительно многочисленная группа насекомых, исследованная на

различном географическом уровне, отличающаяся широким распространением, высоким миграционным потенциалом, выраженной

биотопической приуроченностью и хорошей таксономической изученностью. Фаунистическая изученность булавоусых чешуекрылых позволила специалистам уделять больше внимания описанию пространственно-типологической структуры населения этой группы насекомых в природных сообществах и выявлению закономерностей её формирования в разных региональных условиях. Благодаря короткому жизненному циклу они быстро реагируют на изменения условий окружающей среды изменением видового состава, структуры населения в природных сообществах и колебанием границ ареалов, что в сочетании с возможностью визуальной идентификации делает их удобной модельной группой для эколого-географических исследований [1–4].

На территории Русской равнины многолетние синэкологические исследования булавоусых чешуекрылых проводились в подзонах средней и северной тайги [5, 6]. Южная тайга в этом отношении изучена сравнительно слабо. Между тем можно ожидать, что на стыке бореального и суббореального географических поясов топические группировки Papilionoidea заметно отличаются по составу и относительному обилию видов от представленных на северных территориях.

В Кировской области ландшафты южной тайги, занимающие около 70% всей территории, в последние десятилетия были сильно трансформированы в результате масштабных лесозаготовок, интенсивного развития сельского хозяйства, транспортной и городской инфраструктуры. Всё это вкупе с многолетними климатическими флуктуациями не могло не отразиться на составе и численности булавоусых чешуекрылых в природных сообществах. Описание пространственно-типологической структуры населения этой группы насекомых в подзоне южной тайги и оценка последствий воздействия на неё различного рода антропогенных факторов на фоне общей слабой изученности этого аспекта на территории Кировской области являются актуальными не только в научном, но и в природоохранном отношении.

Цель настоящей работы – описание и выявление факторов, влияющих на формирование структуры населения булавоусых чешуекрылых луговых местообитаний южной тайги Кировской области, с которыми экологически связаны более 60% коренных видов надсемейства, зарегистрированных в данной подзоне растительности региона.

Материал и методы исследования

Материалом для настоящей работы послужили результаты синэкологических исследований булавоусых чешуекрылых, проводившихся в 2014–2022 гг. в семи географических точках (локалитетах) на территории южной тайги Кировской области (рис. 1). Совокупность видов, выявленных в природных сообществах одного географического пункта в радиусе 20 км, рассматривается нами как локальная фауна (ЛФ), или проба фаунистической ситуации в нём [2].

Одними из основных типов луговых местообитаний булавоусых чешуекрылых в подзоне южной тайги Кировской области являются крупнозлаковые, мелкозлаковые и мелкозлаково-мелкоразнотравные луга. Большинство они являются суходольными, сформировавшимися на месте вырубленных в процессе заготовки древесины или под распашку земли лесных насаждений. В растительном покрове данных фитоценозов доминируют злаки *Dactylis glomerata*, *Agrostis tenuis*, *Phleum pratense* и др., многочисленны различные бобовые (*Trifolium* sp., *Lathyrus pratensis*, *Medicago* sp. и др.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum*), подмаренники *Galium* sp., манжетки *Alchemilla* sp., тысячелистник *Achillea* sp., бедренец-камнеломка (*Pimpinella saxifraga*) [7]. В настоящей работе все подобные луговые участки отнесены к одному типу местообитаний булавоусых чешуекрылых.

Изучалось население булавоусых чешуекрылых 16 луговых участков в шести локальных фаунах, лежащих в семи административных районах области: Юрьянском (Ф-1, 2, 3), Слободском (Ос), Кирово-Чепецком (Н-1, 2, Гл., Л-1, 2, 3), Оричевском (А), Кумёнском (К-1, 2, 3), Сунском (С-1), Нолинском (М). За время учётов было пройдено более 100 км и учтено более 4,1 тыс. экземпляров бабочек.

Структура населения булавоусых чешуекрылых южнотаёжных лугов Кировской области выявлялась на основе соотношения численности имаго разных видов в топических группировках. Топической группировкой в данной работе мы называем совокупность видов булавоусых чешуекрылых, зарегистрированных в одном местообитании, в нашем случае на одном луговом участке, в течение полевого сезона. На обследуемых лугах закладывались трансекты шириной 10 м и длиной от 200 до 500 м в зависимости от площади фито-

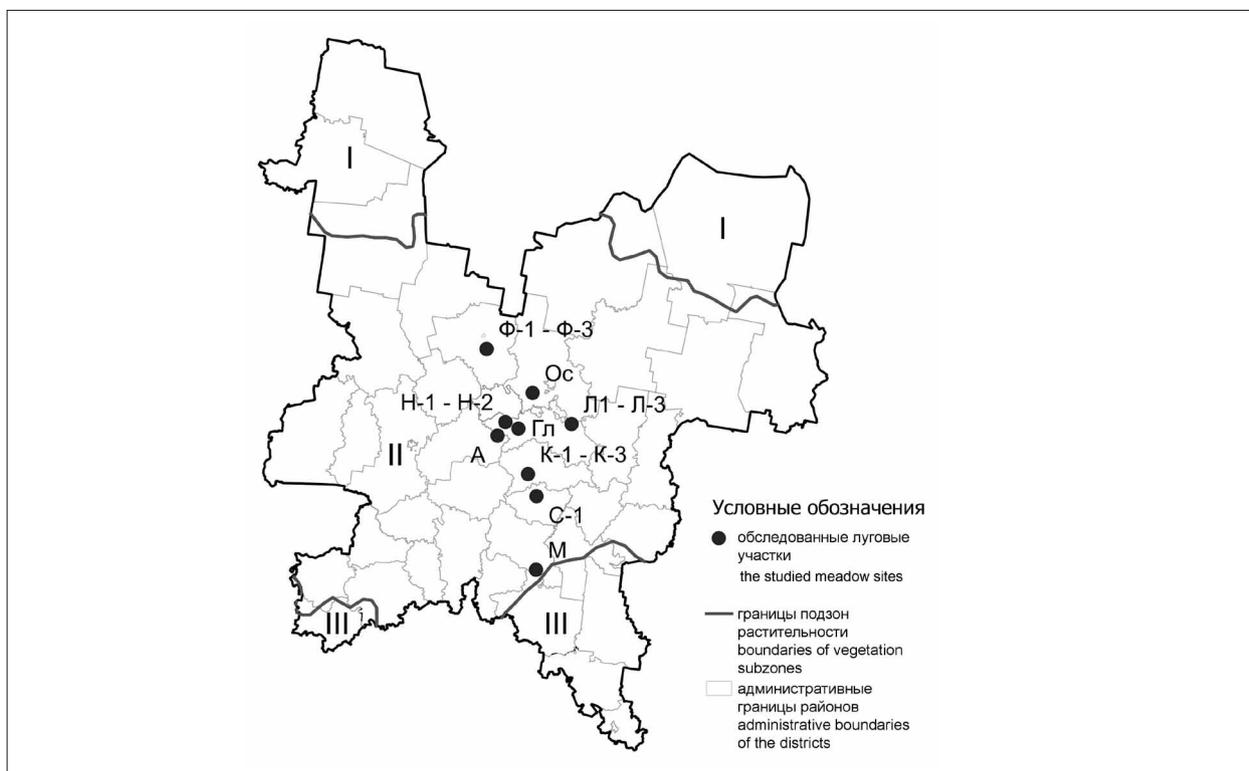


Рис. 1. Места сбора материала на территории южной тайги Кировской области. Подзоны растительности: I – средняя тайга, II – южная тайга, III – хвойно-широколиственные леса. Условные обозначения обследованных луговых участков см. в таблице 1

Fig. 1. Material collection sites in the southern taiga of Kirov Region. Vegetation subzones: I – middle taiga, II – southern taiga, III – coniferous-deciduous forests. See Table 1 for symbols of the studied meadow sites

ценоза и мозаики местообитаний на местности, на которых проводились визуальные количественные учёты имаго по общепринятым для булавоусых чешуекрылых методикам [8–11]. Наблюдения проводились при температуре атмосферного воздуха +13...+30 °С, утром, примерно в одно и то же время в течение всего полевого сезона с середины мая по август, как правило, шесть раз за сезон на каждом лугу, в среднем (в зависимости от погодных условий) один раз в 7–14 дней. При невозможности визуальной идентификации видов непосредственно в полёте, они отлавливались при помощи энтомологического сачка при прохождении трансекты в обратном направлении. В случае определения отловленных экземпляров в полевых условиях, их отпускали, чтобы не искажать результаты дальнейших учётов.

Для описания доминантной структуры топических группировок булавоусых чешуекрылых и оценки частотного распределения видов применялась десятибалльная логарифмическая шкала относительного обилия видов [12, 13]. Данный приём использовался для минимизации различий при проведении учётов на разных трансектах и в разные годы. Учтённые

на одном участке в течение полевого сезона виды булавоусых чешуекрылых располагали в порядке возрастания их обилия и на основании этого выделяли самых многочисленных в сборах и, предположительно, в составе топической группировки. Доминирующими по численности (наиболее обильными) считались виды, доля которых в сборах превышала 15%. Виды, доля которых колебалась от 10 до 15%, относили к субдоминантам. Наиболее обильные виды и субдоминанты составляют основу собранного материала на учётном участке, их совокупная доля нередко превышает 75%, то есть три четверти видового состава топической группировки. Визуальное представление о заселяющих луговые сообщества булавоусых чешуекрылых связано, в первую очередь, с этими категориями видов, поэтому все вместе они в работе именуется «фоновыми». По принятой логарифмической шкале к фоновым относятся виды, имеющие балл относительного обилия от 6 до 10.

Сходство топических группировок (бета-разнообразие) оценивалось с помощью индекса Чекановского-Серенсена для количественных данных с последующим построением на

основе его значений дендрограммы методом кластерного анализа (в качестве способа присоединения использовался метод среднего), графов включения-сходства (разбиение на компоненты связности), неметрического многомерного шкалирования (Non-metric MDS). Для анализа вклада факторов в формирование структуры населения были использованы однофакторный дисперсионный и корреляционный анализ [14].

Для расчёта индексов, построения дендрограмм, графов включения-сходства и тепловой карты корреляции использовались программы PAST версии 4.0 [15], а также надстройка ExcelStatR версии 1.2 [16], для однофакторного дисперсионного анализа – пакет «Анализ данных» MS Excel.

Номенклатура булавоусых чешуекрылых в работе представлена по Каталогу чешуекрылых России [17].

Результаты и обсуждение

За всё время исследований на 16 лугах было отмечено 65 видов булавоусых чешуекрылых (табл. 1), что составляет 56% всех представителей надсемейства в фауне южной тайги Кировской области. Количество зарегистрированных видов (S) на разных участках изменялось от 20 (Ф-3) до 36 (С-4).

Состав фоновых видов булавоусых чешуекрылых на обследованных лугах отличался. На разных участках по численности лидировали девять видов – толстоголовка *Thymelicus lineola*, белянки *Leptidea sinapis* (вопрос о виде-двойнике *L. juvernica* не изучался), *Pieris napi*, голубянки *Plebejus idas* и *P. argus* (визуально учитывались и рассматриваются в статье совместно), нимфалиды *Melitaea didyma*, *Brenthis ino*, *Argynnis aglaja*, сатириды *Aphantopus hyperantus*, *Hyponerphele lycan*. Ни один из названных видов не являлся повсеместно наиболее обильным. На восьми из 16 участков по численности доминировали голубянки *P. idas/argus*, ещё на четырёх участках они были относительно многочисленными (балл 5). Так же на восьми участках в состав фоновых видов входила белянка *P. napi* и толстоголовка *Th. lineola*, на пяти участках – сатирида *H. lycan*, на трёх – белянка *L. sinapis*. Остальные виды в состав фоновых входили только на каком-то одном участке. Голубянки *P. idas/argus* безусловно лидировали лишь на участке Ф-1, толстоголовка *Th. lineola* – на участках Л-1, Л-2. На остальных лугах фон в разных сочетаниях составляли от двух до четырёх видов.

На основе сравнения баллов относительного обилия видов можно выделить три основных типа топических группировок, которые по названиям численно доминирующих видов условно обозначим как группировки типа *idas/argus*, группировки типа *lineola* и группировки типа *hyperantus* (табл. 2). Кроме того, установлены две «промежуточных» группировки, в одной из них совместно доминируют *A. hyperantus*, *Th. lineola* (топическая группировка А), во второй (С-4) явный лидер по численности отсутствует, а к субдоминантам можно отнести *P. idas/argus*, *P. napi*, *Th. lineola*.

Многолетними исследованиями установлено, что количественное соотношение видов булавоусых чешуекрылых в природных сообществах таёжной зоны Русской равнины определяется, главным образом, составом и структурой растительного покрова. Это обуславливает возможность описания пространственно-типологической структуры населения Papilionoidea на основе фитоценотической обстановки в регионе [5, 6, 18]. Другие внешние факторы – географическое положение локальной фауны, ландшафтно-биотопическая структура местности, мозаика местообитаний, уровень антропогенной трансформации природных сообществ и др. – могут ослаблять связь структуры топических группировок булавоусых чешуекрылых с растительностью. В настоящей работе сравнивается население булавоусых чешуекрылых в сходных по растительному покрову природных сообществах, поэтому выраженные отличия в составе фоновых видов обусловлены другими факторами.

Как видно из таблицы 1, различий в составе фоновых видов по географическому принципу чётко не проявляется. В рамках одной локальной фауны он может отличаться и наоборот может быть весьма сходным в удалённых друг от друга локалитетах. Данный вывод в целом подтверждается распределением топических группировок на дендрограмме сходства (рис. 2), графе включения-сходства и результатами неметрического многомерного шкалирования (рис. 3, см. цв. вкладку V).

Значительный вклад в нивелирование влияния состава растительности на структуру топических группировок булавоусых чешуекрылых в рамках исследованных лугов южной тайги Кировской области вносит наличие на исследуемых участках муравейников, их количество и, вероятно, обилие муравьёв, симбиотически связанных с голубянками группы

А. В. Мазеева, А. Г. Татаринов, О. И. Кулакова
«Структура населения булавоусых чешуекрылых
(Lepidoptera, Papilionoidea) луговых местообитаний
подзоны южной тайги». С. 177.

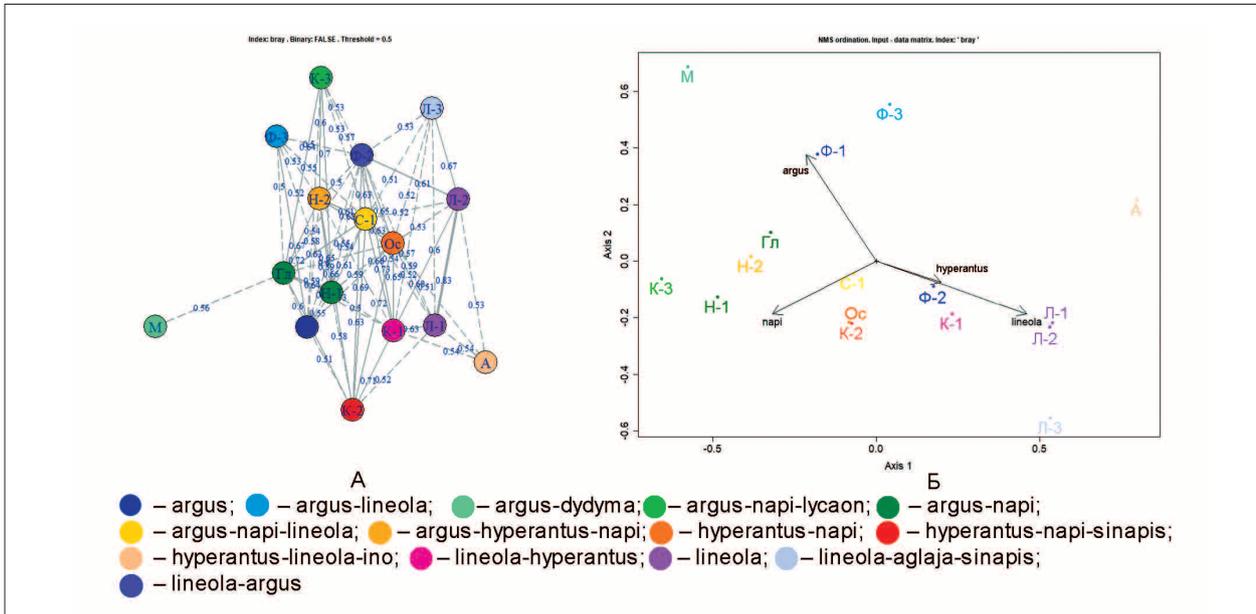


Рис. 3. Группирование луговых топических группировок булавоусых чешуекрылых по сходству фоновых видов (индекс Чекановского-Серенсена для количественных данных). А – графы включения-сходства (метод разбиения на компоненты связности), Б – визуализация с помощью неметрического многомерного шкалирования (Non-metric MDS). Стрелками обозначено направление увеличения относительного обилия видов (Czekanovsky-Sørensen index for quantitative data). А – Inclusion-similarity graphs (method of partitioning into connected components), Б – visualization with non-metric multidimensional scaling (Non-metric MDS). Arrows indicate the direction of increase in the relative species abundance

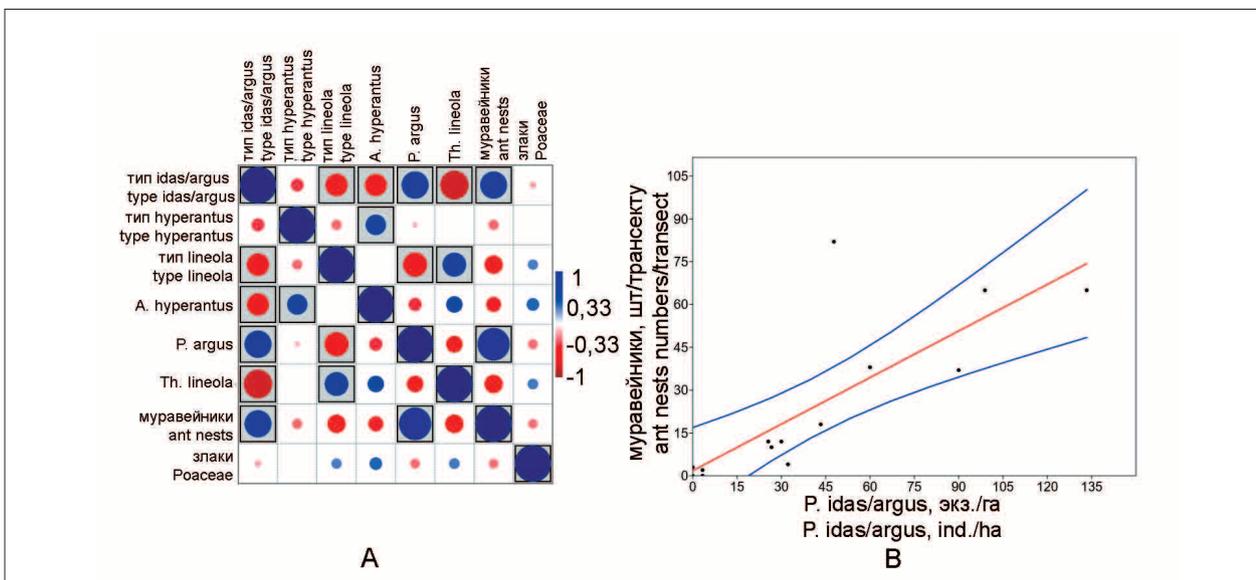


Рис. 4. А – тепловая карта корреляции (Spearman's rs): статистически значимые значения выделены квадратом, цветовая шкала обозначает положительную (синий) и отрицательную (красный) корреляцию; Б – связь численности *P. idas/argus* с количеством муравейников ($r=0,79449$)

Fig. 4. А – heat map of correlation (Spearman's rs): statistically significant values are highlighted with a box, color scale indicates positive (blue) and negative (red) correlation; Б – relationship of *P. idas/argus* abundance with the number of ant nests ($r=0,79449$)

А. В. Мазеева, А. Г. Татаринев, О. И. Кулакова
«Структура населения булавоусых чешуекрылых
(Lepidoptera, Papilionoidea) луговых местообитаний
подзоны южной тайги». С. 177.

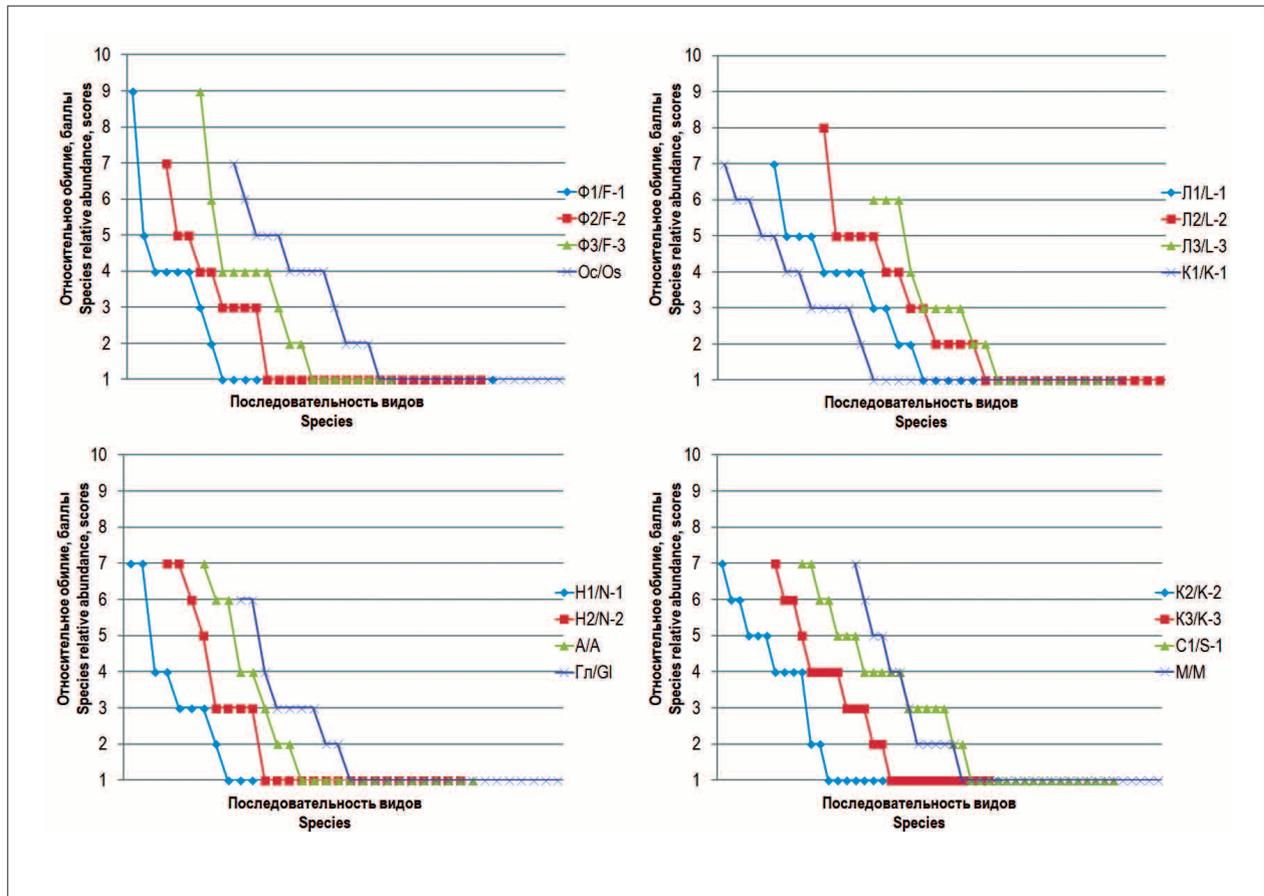


Рис. 5. Графики рангового распределения булавоусых чешуекрылых топических группировок на изученных участках / **Fig. 5.** Graphs of the rank distribution of butterfly topical groups on the studied meadow sites

Таблица 1 / Table 1

Состав и структура населения булавовых чешуекрылых луговых местообитаний южной тайги Кировской области / Butterfly species and abundance in meadow ecosystems of the southern taiga of Kirov Region

Название вида / Species	Луговой участок, баллы относительного обилия вида Meadow site, species relative abundance scores															
	Ф-1 F-1	Ф-2 F-2	Ф-3 F-3	Ос Os	Н-1 N-1	Н-2 N-2	А A	Гл Gl	Л-1 L-1	Л-2 L-2	Л-3 L-3	К-1 K-1	К-2 K-2	К-3 K-3	С-1 S-1	М M
<i>Pyrargus albeus</i> (Hbn.)	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	-
<i>P. malvae</i> (L.)	-	1	2	1	1	-	1	-	1	-	-	1	-	-	1	-
<i>Carterocephalus silvicola</i> (Meig.)	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Thymelicus lineola</i> (Oesh.)	4	7	6	5	3	3	6	3	7	8	6	7	5	4	6	5
<i>T. sylvestris</i> (Poda)	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	1	-	2
<i>Ochlodes sylvanus</i> (Esp.)	1	-	-	2	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	1
<i>Papilio machaon</i> L.	1	1	1	1	1	1	-	2	1	1	-	1	1	-	1	1
<i>Iphiclides podalirius</i> (L.)	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
<i>Leptidea sinapis</i> (L.)	4	3	4	5	4	3	1	1	2	4	6	4	6	2	5	1
<i>Anthocharis cardamines</i> (L.)	1	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Pontia edusa</i> (F.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
<i>Euchloe ausonia</i> (Hbn.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
<i>Aporia crataegi</i> (L.)	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1
<i>Pieris napi</i> (L.)	4	4	1	6	7	6	1	6	1	3	3	5	6	6	7	1
<i>P. rapae</i> (L.)	1	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	1	-	5	1
<i>Colias crocea</i> (Frc.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
<i>C. hyale</i> (L.)	-	1	-	1	1	1	1	1	-	-	-	1	4	-	-	1
<i>C. myrmidone</i> (Esp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
<i>Gonopteryx rhamni</i> (L.)	1	1	-	4	3	3	1	1	4	2	1	1	2	3	1	5
<i>Lycaena phlaeas</i> (L.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-
<i>L. dispar</i> (Haw.)	-	1	1	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
<i>L. hippothoe</i> (L.)	1	-	-	1	-	1	1	-	1	-	-	1	1	-	1	-
<i>L. alciphron</i> (Rott.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

группа <i>M. athalia</i> (Rott.)	1	1	-	1	-	-	2	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3
<i>M. athalia</i> (Rott.) species group	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
<i>Argynnis raphia</i> (L.)	1	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	2	2
<i>A. adippe</i> ([Den. et. Schiff.])	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
<i>A. niobe</i> (L.)	2	3	1	1	1	1	4	1	4	4	4	6	5	1	-	3	-
<i>A. aglaja</i> (L.)	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lasiommata maera</i> (L.)	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Melanargia russiae</i> (Esp.)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Coenonympha hero</i> (L.)	4	5	3	4	1	3	-	3	3	2	1	1	3	4	4	4	1
<i>C. glycerion</i> (Brkh.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
<i>C. pamphilus</i> (L.)	5	4	4	7	1	7	7	4	5	5	3	6	6	7	2	5	2
<i>Aphantopus hyperantus</i> (L.)	1	1	1	4	2	1	1	3	-	1	1	1	1	1	6	1	4
<i>Нурперфеле lycan</i> (Rott.)	1	1	4	1	1	1	4	-	1	1	-	1	1	1	1	1	1
<i>Maniola jurtina</i> (L.)	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Erebia ligea</i> (L.)	33	29	18	30	27	25	23	27	25	28	20	33	31	27	36	35	35
Всего видов Total number of species																	

Примечание: Ф – Фролы, Ос – Осинцы, Н – Нагоряна, Гл – Глушиха, А – Адышево, Л – Луговой, Кум – Кумены, С – Суна, М – Медведок. Серой заливкой выделены фоновые виды (баллы 6–10); прочерк означает, что вид не зарегистрирован.

Note: F – Froly, Os – Osinty, N – Nagoryana, Gl – Glushikha, A – Adyshevo, L – Lugovoy, Kum – Kumeny, S – Suna, M – Medvedok. Gray shading in cells means background species (scores 6–10); a dash means that species is not recorded.

P. idas/argus, как это показано в литературе [19]. Эта взаимосвязь подтверждается результатами однофакторного дисперсионного (табл. 3) и корреляционного анализа (рис. 4, см. цв. вкладку V). Определённая связь типов топических группировок с растительностью, тем не менее, сохраняется: на всех лугах, где сформировались группировки типа *P. idas/argus*, присутствовали и, как правило, были достаточно многочисленны те или иные бобовые. Это обусловлено трофическими связями гусениц сем. *Lycaenidae*, большинство которых, включая и виды группы *P. idas/argus*, являются узкими олигофагами бобовых растений. Роль относительного обилия злаков здесь оказывается мала и статистически недостоверна. Виды *A. hyperantus* и *T. lineola* на преимагинальных стадиях развития трофически связаны со злаками. Однако связь их относительного обилия в группировках типа *hyperantus*, *lineola*, *hyperantus-lineola* с относительным обилием злаков оказалась мала и статистически не достоверна ($p > 0,05$).

Форма графиков рангового распределения видов булавоусых чешуекрылых на

изученных лугах (рис. 5, см. цв. вкладку VI). соответствует логнормальной и логарифмической моделям. Как известно, логарифмическая модель, характеризующая сообщества с небольшим количеством обильных видов и большим количеством редких, отвечает структуре топических группировок с преобладанием голубянок *P. idas/argus* (Ф-1, Ф-3, Г, К-3, М), реже с доминированием *T. lineola* (Л-1, Л-2) и *A. hyperantus* (А). В первом случае это может быть обусловлено присутствием на самом деле не одного, а двух видов голубянок, а во втором особенностями мозаики местообитаний, точнее, выкашиванием многих других лугов в окрестностях. Распределение видов на остальных лугах описывается логнормальной моделью, характерной для больших, зрелых, естественных ненарушенных сообществ [20].

Заключение

Луговые местообитания широко распространены в подзоне южной тайги Кировской области и являются одними из основных местообитаний булавоусых чешуекрылых – их

Таблица 2 / Table 2

Типы луговых топических группировок булавоусых чешуекрылых, выделяемые по составу фоновых видов / Types of meadow butterfly groups distinguished by the background species' composition

Топическая группировка Topical group	Доминанты (>15%) Dominants (>15%)		Субдоминанты (10–15%) Subdominants (10–15%)
тип <i>idas/argus</i> / type <i>idas/argus</i>			
Ф-1 / F-1	<i>P. idas/argus</i>	–	–
Ф-3 / F-3	<i>P. idas/argus</i>	–	<i>T. lineola</i>
М / M	<i>P. idas/argus</i>	–	<i>M. didyma</i>
К-3 / K-3	<i>P. idas/argus</i>	–	<i>P. napi</i> , <i>H. lycaon</i>
Н-1 / N-1	<i>P. idas/argus</i>	<i>P. napi</i>	–
Гл / Gl	<i>P. idas/argus</i>	<i>P. napi</i>	–
Н-2 / N-2	<i>P. idas/argus</i>	<i>A. hyperantus</i>	<i>P. napi</i>
тип <i>lineola</i> / type <i>lineola</i>			
Л-1 / L-1	<i>T. lineola</i>	–	–
Л-2 / L-2	<i>T. lineola</i>	–	–
Ф-2 / F-2	<i>T. lineola</i>	–	<i>P. idas/argus</i>
Л-3 / L-3	<i>T. lineola</i>	–	<i>A. aglaja</i> , <i>L. sinapis</i>
К-1 / K-1	<i>T. lineola</i>	–	<i>A. hyperantus</i>
тип <i>hyperantus</i> / type <i>hyperantus</i>			
Ос / Os	<i>A. hyperantus</i>	–	<i>P. napi</i>
К-2 / K-2	<i>A. hyperantus</i>	–	<i>P. napi</i> , <i>L. sinapis</i>
«промежуточные» типы / “intermediate” types			
А / A	<i>A. hyperantus</i>	<i>T. lineola</i>	<i>B. ino</i>
С-1 / S-1	–	–	<i>P. argus</i> , <i>P. napi</i> , <i>T. lineola</i>

Примечание: прочерк означает отсутствие доминанта или субдоминанта.
Note: a dash means the absence of dominant or subdominant.

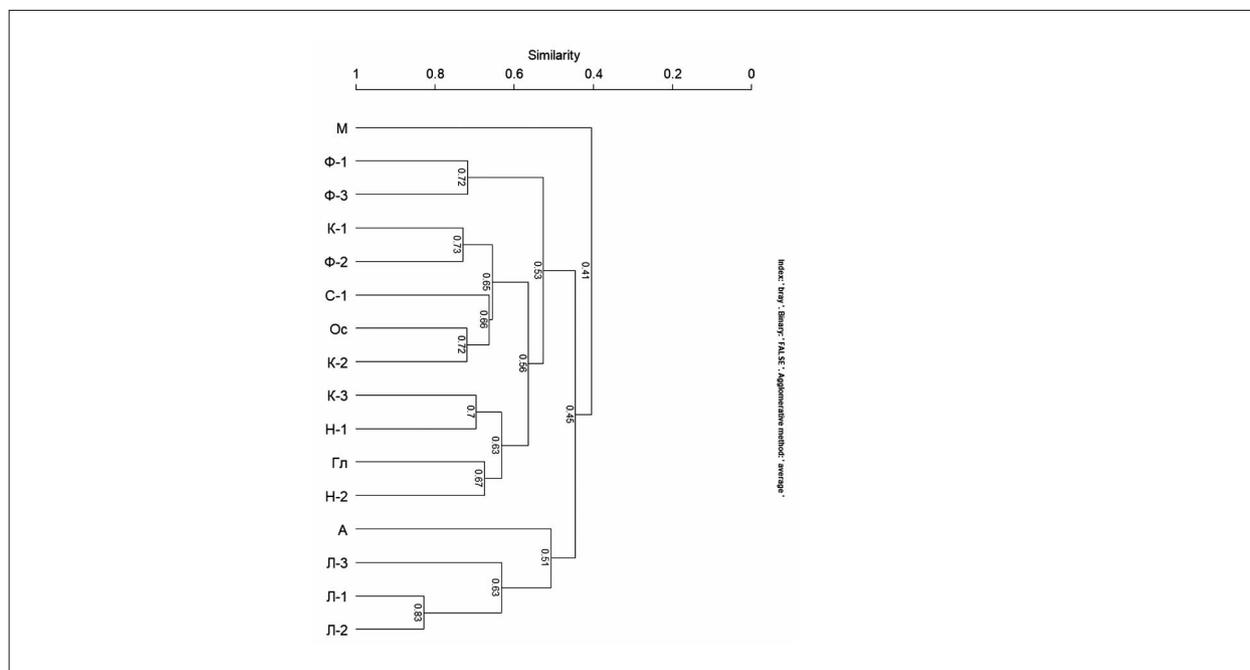


Рис. 2. Дендрограмма сходства луговых топических группировок булавоусых чешуекрылых с учётом относительного обилия видов
Fig. 2. Dendrogram of the similarity of butterfly meadow groups taking into account the relative species abundance

Таблица 3 / Table 3

Статистически значимые результаты однофакторного дисперсионного анализа
 Statistically significant results of one-way ANOVA

Влияние количества муравейников на трансекте на: The number of ant nests on the transect affects:	F	2
относительное обилие <i>P. idas/argus</i> , % the relative abundance of <i>P. idas/argus</i> , %	8,14	0,69
плотность <i>P. idas/argus</i> , экз./га the density of <i>P. idas/argus</i> , ind./ha	9,12	0,71
тип топической группировки (без «промежуточных» типов) the type of butterfly topical groups (without “intermediate” types)	8,62	0,66
выделение топической группировки типа <i>idas/argus</i> the topical group type <i>idas/argus</i> selection	28,41	0,7

Примечание: F – расчётное значение критерия Фишера, 2 – сила влияния фактора на выборку, $p < 0,05$.
 Note: F – calculated Fisher criterion, 2 – effect size on the sample, $p < 0.05$.

постоянно или временно заселяет более 50% видов региональной фауны. Данные фитоценозы характеризуются самыми высокими значениями показателей видового разнообразия Rapilionoidea и могут рассматриваться в качестве одного из модельных типов сообществ при выявлении закономерностей формирования пространственно-типологической структуры населения таёжной зоны Русской равнины.

Проведённые исследования в целом подтвердили вывод об устойчивой связи структуры населения булавоусых чешуекрылых с растительным покровом. Одновременно были выявлены внешние факторы, значительно осла-

бляющие эту зависимость. Было установлено, что одним из основных факторов в данном ряду является наличие и количество муравейников на лугах. В однотипных по растительному покрову луговых местообитаниях при высокой концентрации муравьиных гнёзд в топических группировках булавоусых чешуекрылых по численности лидируют голубянки группы *Plebeius idas/argus*, которые в своём развитии биологически связаны с муравьями. На участках, где муравейники отсутствуют или их число незначительно, доминируют толстоголовка *Th. lineola* и сатирида *A. hyperantus*, гусеницы которых развиваются на злаках, формирующих основу растительного покрова изучаемых лугов.

Результаты проведённых исследований не опровергают положение о том, что в аналогичных растительных сообществах формируется сходное население булавоусых чешуекрылых, а лишь подтверждают тезис о том, что эта связь может маскироваться, ослабляться и даже нивелироваться под влиянием целого ряда внешних факторов. Одним из таких факторов, определяющих облик топических группировок Papilionoidea изученных лугов южной тайги Кировской области, являются муравейники.

Работа выполнена в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН в рамках государственного задания по теме «Закономерности формирования, пространственно-структурной организации и динамики фауны и населения животных европейского северо-востока России и сопредельных арктических и бореальных территорий в изменяющихся условиях окружающей среды» № гос. регистрации 125013101229-9.

References

1. Rákósy L., Schmitt T. Are butterflies and moths suitable ecological indicator systems for restoration measures of semi-natural calcareous grassland habitats? // *Ecol. Indic.* 2011. V. 11. No. 5. P. 1040–1045. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.10.010
2. Tatarinov A.G. Geography of diurnal Lepidoptera of the European North-East of Russia. Moskva: KMK Scientific Press Ltd., 2016. 256 p. (in Russian).
3. Wepprich T., Adrion J.R., Ries L., Wiedmann J., Haddad N. M. Butterfly abundance declines over 20 years of systematic monitoring in Ohio, USA // *PLoS One*. 2019. V. 14. No. 7. Article No. e0216270. doi: 10.1371/journal.pone.0216270
4. Middleton-Welling J., Dapporto L., García-Barros E., Wiemers M., Nowicki P., Plazio E., Bonelli S., Zaccagno M., Šašić M., Liparova J., Schweiger O., Harpke A., Musche M., Settele J., Schmucki R., Shreeve T. A new comprehensive trait database of European and Maghreb butterflies, Papilionoidea // *Sci. Data*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 351. doi: 10.1038/s41597-020-00697-7
5. Tatarinov A.G., Dolgin M.M. Species diversity of Rhopalocera in the European North-East of Russia. Sankt-Peterburg: Nauka, 2001. 244 p. (in Russian).
6. Bolotov I.N. Seasonal aspects of butterfly assemblages (Lepidoptera, Diurna) of the Northern taiga subzone in the west of the Russian Plain // *Arctic Environmental Research*. 2009. No. 1. P. 51–63 (in Russian).
7. Marakulina S.Yu., Degteva S.V. Cenofloras of dry meadows of the middle and southern taiga of the Kirov Region // *Botanicheskii Zhurnal*. 2008. V. 93. No. 6. P. 840–852 (in Russian).
8. Yamamoto M. Notes on the methods of belt transect census of butterflies // *J. Faculty Sci. Hokkaido Univ. Ser. 6. Zool.* 1975. V. 20. No. 1. P. 93–116.
9. Pollard E. A method for assessing changes in the abundance of butterflies // *Biol. Conserv.* 1977. V. 12. No. 2. P. 115–134. doi: 10.1016/0006-3207(77)90065-9
10. Pollard E., Yates T.J. Monitoring butterflies for ecology and conservation. The British butterfly monitoring scheme. London: Chapman & Hall, 1993. 274 p.
11. Sevilleja C.G., van Swaay C.A.M., Bourn N., Collins S., Settele J., Warren M.S., Wynhoff I., Roy D.B. Butterfly transect counts: Manual to monitor butterflies. Report VS2019.016, Butterfly Conservation Europe & De Vlinderstichting / Dutch Butterfly Conservation, Wageningen, 2019. 15 p.
12. Pesenko Yu.A. Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies. Moskva: Nauka, 1982. 287 p. (in Russian).
13. Gorbach V.V. Fauna and ecology of Karelia butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea et. Papilionoidea). Petrozavodsk: Izdatelstvo PetrGU, 2013. 254 p. (in Russian).
14. Korosov A.V., Gorbach V.V. Computer processing of biological data: methodological manual. Petrozavodsk: Izdatelstvo PetrGU, 2007. 76 p. (in Russian).
15. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontol. Electron.* 2001. V. 4. No. 1. P. 1–9.
16. Novakovskiy A.B. Interaction between Excel and statistical package R for ecological data analysis // *Vestnik instituta biologii Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya RAN*. 2016. No. 3 (197). P. 26–33 (in Russian). doi: 10.31140/j.vestnikib.2016.3(197).4
17. Catalogue of the Lepidoptera of Russia / Ed. S.Yu. Sinev. Sankt-Peterburg: Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, 2019. 448 p. (in Russian).
18. Tatarinov A.G. Butterfly species assemblages (Lepidoptera, Rhopalocera) in the Northern Europe: formation, stability and variability // *XII Congress of the Russian Entomological Society: tezisy dokladov*. Sankt-Peterburg: Russian Entomological Society, 2002. P. 343–344 (in Russian).
19. Jordano D., Rodríguez J., Thomas C.D., Fernández Haeger J. The distribution and density of a lycaenid butterfly in relation to *Lasius* ants // *Oecologia*. 1992. V. 91. No. 3. P. 439–446. doi: 10.1007/BF00317635
20. Magurran A.E. Ecological diversity and its measurement. Moskva: Mir, 1992. 181 p. (in Russian).

Максимальный возраст обыкновенного сига в бассейне реки Печоры

© 2025. Э. И. Бознак, к. б. н., с. н. с., В. И. Пономарев, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: boznak@ib.komisc.ru, ponomarev@ib.komisc.ru

В работе проанализированы полученные в 1985–2022 гг. данные о предельном зарегистрированном возрасте обыкновенного сига *Coregonus lavaretus* L., обитающего в бассейне р. Печоры (всего изучено 1948 экз. рыб из 12 водотоков, 18 разнотипных озёр и Коровинской губы Печорского моря). В разных выборках максимальный возраст варьировал от 5+ до 21+. Жилые группировки, как правило, характеризуются более высокими показателями максимального возраста (5+ – 21+, медиана 9) по сравнению с полупроходной формой сига (5+ – 9+, медиана 8). Наибольшие значения (18+ и 21+) зафиксированы у экземпляров сига из труднодоступных водоёмов озёрно-речной системы бассейна р. Малый Паток (приток второго порядка р. Печоры). Теоретический предельный возраст сига, рассчитанный на основе коэффициентов уравнения Берталанфи (k и t_0), описывающего линейный рост сига в разных водоёмах бассейна р. Печоры, варьирует от 12 до 44 лет (в среднем около 25 лет). Существенных различий по этому показателю между полупроходной и жилой формой сига не наблюдается. Максимальный зарегистрированный возраст печорского сига (17+ – 21+) может достигать 70–80% от теоретических значений. По-видимому, основным фактором, ограничивающим продолжительность жизни сига в естественных водоёмах, является влияние рыболовства.

Ключевые слова: обыкновенный сиг, максимальный возраст, бассейн р. Печоры.

Maximum age of *Coregonus lavaretus* in the Pechora River basin

© 2025. E. I. Boznak ORCID: 0000-0001-7049-1472

V. I. Ponomarev ORCID: 0000-0002-0863-736X

Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Science,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: boznak@ib.komisc.ru, ponomarev@ib.komisc.ru

The work analyzes data on the maximum recorded age of *Coregonus lavaretus* caught in different water bodies of the Pechora River basin (a total of 1948 specimens from 12 rivers, 18 different types of lakes and Korovinskaya Bay of the Pechora Sea). Field collections of materials were carried out in the period from 1985 to 2022. In different samples, the maximum age varied from 5+ to 21+. Residential groups are characterized by higher maximum age (5+ – 21+, median 9) compared to the semi-anadromous form of whitefish (5+ – 9+, median 8). The highest values (18+ and 21+) were recorded for whitefish living in hard-to-reach reservoirs of the lake-river system of the Maly Patok River (a second-order tributary of the Pechora River). The catchment area of this river is entirely part of the territory of the Federal National Park “Yugyd va”, included in the UNESCO World Heritage List. Today, this age is apparently the maximum for whitefish in water bodies of the European Northeast of Russia and is close to the limit values for this fish species. The theoretical age limit for whitefish varies from 12 to 44 years (on average about 25 years) and describes the linear growth of whitefish in different reservoirs of the Pechora River basin. It was estimated on the basis of the coefficients of the Bertalanffy equation (k and t_0). A similar value (28–35 years) is obtained if the calculations use seven times the duration of maturation period (4+ – 5+ years). There are no significant differences in the maximum theoretical age between the semi-anadromous and residential forms of the whitefish. The maximum recorded ages of Pechora whitefish (17+ – 21+) can reach 70–80% of theoretical values. Apparently, the main factor limiting the lifespan of whitefish in natural reservoirs is intensive fishing.

Keywords: *Coregonus lavaretus*, maximum age, the Pechora River basin.

Максимальная продолжительность жизни является одной из ключевых характеристик жизненной стратегии и важным показателем, используемым при изучении динамики популяций рыб, оценке их состояния и планировании мероприятий по рациональному использованию рыбных ресурсов [1–3]. Продолжительность жизни значительно варьирует как у представителей различных систематических групп, так и в разных популяциях одного вида [4]. Известно, что длительность жизненного цикла рыб в той или иной степени связана с дефинитивными размерами тела, типом питания, обеспеченностью пищей, скоростью роста, географическим положением и температурными условиями водоёма, уровнем смертности (в том числе промысловой) и другими факторами биотической и абиотической природы [1, 5–7].

Обыкновенный сиг *Coregonus lavaretus* (Linnaeus, 1758) – циркумполярный вид, широко распространённый в озёрах и реках бассейна Северного Ледовитого океана от Баренцева и Белого морей до Чукотки [8, 9]. Обширный ареал этого вида рыб, его высокий внутривидовой полиморфизм и обитание в условиях, различающихся не только по экологическим параметрам, но и по степени антропогенной нагрузки, делают сига удобным объектом для изучения разнообразия реализуемых жизненных стратегий.

В бассейне р. Печоры сиг, представленный малотычинковой формой [10], встречается в большинстве притоков и многих озёрах, расположенных на её водосборе [11, 12]. Однако в водоёмах западных склонов Приполярного и Полярного Урала этот вид встречается спорадически [13]. В этом районе наибольшее

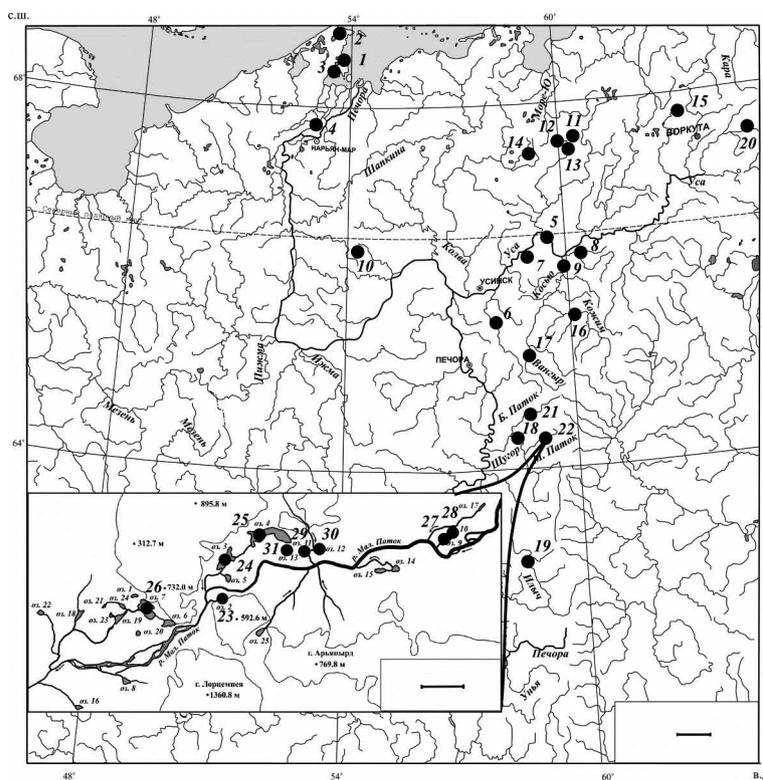


Рис. 1. Карта-схема бассейна р. Печоры. Места сбора материала (●): 1 – Коровинская губа, 2 – оз. Кузнецкое, 3 – оз. Лощиха, 4 – Кудрин шар (дельта р. Печоры), 5 – р. Уса, 6 – р. Большая Сыня, 7 – р. Заострённая, 8 – р. Кочмес, 9 – р. Косью, 10 – Ваглейские озёра, 11 – оз. Ватьярты, 12 – оз. Лангутаты, 13 – оз. Хоседаты, 14 – оз. Колваты, 15 – оз. Харбейты, 16 – р. Кожим, 17 – р. Вангыр, 18 – р. Щугор, 19 – р. Илыч, 20 – оз. Большое Кузьты, 21 – р. Большой Паток, 22 – р. Малый Паток. Масштаб: 40 км в 1 см. На врезке – озёра бассейна р. Малый Паток: 23 – оз. № 2, 24 – оз. № 3, 25 – оз. № 4, 26 – оз. № 7, 27 – оз. № 9, 28 – оз. № 10, 29 – оз. № 11, 30 – оз. № 12, 31 – оз. № 13. Масштаб: 1 км в 1 см

Fig. 1. Map-scheme of the Pechora River basin. Fish collection sites (●): 1 – Korovinskaya Bay, 2 – Lake Kuznetskoe, 3 – Lake Loshchikha, 4 – Kudrin shar (the Pechora River delta), 5 – Usa River, 6 – Bolshaya Synya River, 7 – Zaostryonnaya River, 8 – Kochmes River, 9 – Kosyu River, 10 – Vagleyskiye lakes, 11 – Lake Vatiyarty, 12 – Lake Langutaty, 13 – Lake Khosedaty, 14 – Lake Kolvaty, 15 – Lake Kharbeyty, 16 – Kozhim River, 17 – Vangyr River, 18 – Shchugor River, 19 – Ilyich River, 20 – Lake Bolshoe Kuzty, 21 – Bolshoy Patok River, 22 – Maly Patok River. Scale: 40 km in 1 cm. Inset map – lakes of Maly Patok River basin: 23 – Lake No. 2, 24 – Lake No. 3, 25 – Lake No. 4, 26 – Lake No. 7, 27 – Lake No. 9, 28 – Lake No. 10, 29 – Lake No. 11, 30 – Lake No. 12, 31 – Lake No. 13. Scale: 1 km in 1 cm

распространение сига получил в горной озёрно-речной системе верховой р. Малый Паток (уральский приток р. Печоры II порядка), где он обнаружен в 13 из 21 населённых рыбной озёр [14]. Большинство водоёмов бассейна р. Печоры испытывают интенсивный пресс нерационального (часто незаконного) потребительского рыболовства. В итоге происходит устойчивое снижение уловов сиговых [15], а в ряде случаев наблюдается значительное омоложение возрастной структуры популяций [10].

Цель работы – обобщить имеющуюся информацию о максимальном возрасте сига, зарегистрированном в реках и озёрах бассейна р. Печоры.

Материал и методы исследования

В работе использован материал, накопленный нами в ходе более чем 30-летних ихтиологических исследований бассейна р. Печоры. Общий объём обработанного материала составил 1948 экз. сига, отловленного в разнотипных водных объектах, относящихся к этой территории (рис. 1).

В большинстве случаев отлов сига проводили ставными жаберными сетями с ячейёй 20–40 мм (в озёрах бассейна р. Малый Паток – ячейёй 10–60 мм), на реках Косью и Вангыр использовали тягловые неводы длиной от 30 до 150 м и ячейёй 8–40 мм.

Биологический анализ выполнен на свежепойманном материале по стандартной методике [16]. Массу тела рыб определяли с точностью до 1 г, длину тела по Смитту (FL) – с точностью до 1 мм. Чешую для определения возраста отбирали из первого–второго чешуйного ряда над боковой линией, под спинным плавником. Определение возраста и измерения радиуса осуществляли с применением бинокулярного микроскопа (увеличение 2 × 8). За годовое кольцо принимали внешнюю границу зоны выклинивающихся склеритов [8, 17]. Для снижения погрешностей при определении возраста и оценке роста все измерения проводил один оператор.

Анализ роста рыб выполняли методом обратного расчисления по формуле прямой пропорциональности Эйнара Леа [18, 19]. На основе этих данных для большинства выборок определяли параметры уравнения роста Берталанфи [19, 20]. Показатель скорости приближения размеров рыбы к асимптотической длине тела (константа k из уравнения Берталанфи) использован для оценки теорети-

ческого предельного возраста рыб с помощью формулы Тейлора [21, 22].

Результаты и обсуждение

В исследованных водоёмах бассейна р. Печоры максимальный зарегистрированный возраст сига варьирует от 5+ (рыбы шестого года жизни) до 21+ лет (табл.). При этом жилые группировки, как правило, характеризуются более высокими показателями максимального возраста (5+ – 21+, медиана 9) по сравнению с полупроходной формой сига (5+ – 9+, медиана 8,5). Следует отметить, что для анадромного сига р. Печоры в литературе приводятся заметно более высокие показатели (максимальный возраст до 17+ при длине 660 мм и массе тела 5000 г) [10]. Однако, максимальный возраст, зафиксированный у сига в озёрно-речной системе р. Малый Паток, превосходит эти показатели.

Действительно, в одном из безымянных ледниковых озёр этой озёрно-речной системы 25.10.2007 г. был отловлен половозрелый (IV–V стадия зрелости) самец обыкновенного сига длиной (FL) 605 мм и массой 4200 г. Возраст этой особи составил 21+ год (рис. 2). Озеро, в котором был обнаружен данный экземпляр, находится в долине горного участка р. Малый Паток на высоте 232 м над уровнем моря (64°19'56" с. ш., 59°12'17" в. д.) и соединено с руслом реки протокой.

Годовые кольца на чешуе данной особи, в течение первых восьми лет жизни, представляли собой достаточно чёткие зоны выклинивания склеритов (cutting over) в дорсолатеральной и вентролатеральной зонах чешуи. В дальнейшем (начиная с девятого годового кольца) они сменяются лишёнными склеритов участками, залегающими между зонами с нормально выраженными склеритами. Оба эти элемента принимаются за годовые кольца [8, 17].

Известно, что предельный возраст обыкновенного сига оценивается в 15–20 лет [8, 9]. По данным FishBase, максимальная продолжительность жизни этого вида рыб составляет 14–15 лет [23]. В большинстве водоёмов европейского северо-востока России зарегистрированный возраст сига не превышает 10–12 лет [10, 24]. Особи возрастом 13+ лет отмечены в некоторых озёрах Большеземельской тундры [11], ещё большие значения приводятся для жилой формы сига р. Вымь (15+) и полупроходного сига р. Печоры (17+) [10]. Таким образом, возраст сига, зарегистрированный

Максимальный возраст сига исследованных водоёмов бассейна р. Печоры по наблюдаемым и расчётным данным / Maximum age of whitefish in the studied reservoirs of the Pechora River basin according to observed and calculated data

Водоём (водоток), год Water body (watercourse), year	Тип группировки Type of group	п, экз. n, spec.	Максимальный возраст Maximum age	
			Наблюдаемый Observed	Теоретический Theoretical
Печорское море / Pechora Sea				
Коровинская губа, 1999 Korovinskaya Bay, 1999	полупроходная semi-anadromous	40	8+	27
оз. Кузнецкое, 2002 Lake Kuznetskoe, 2002	полупроходная semi-anadromous	35	9+	17
оз. Лощиха, 2003 Lake Loshchikha, 2003	полупроходная semi-anadromous	5	5+	29
Бассейн р. Печоры, среднее и нижнее течение (равнинная область) The Pechora River basin, middle and lower reaches (plain area)				
Кудрин шар, 1997 Kudrin shar, 1997	полупроходная semi-anadromous	20	9+	18
р. Уса, 1995–2008 The Usa River, 1995–2008	речная / river	178	9+	26
р. Большая Сыня, 2002 The Bolshaya Synya River, 2002	речная / river	34	5+	12
р. Заострённая, 1995 The Zaostryonnaya River, 1995	речная / river	102	7+	42
р. Кочмес, 1994–1995 The Kochmes River, 1994–1995	речная / river	75	8+	30
р. Косью, 1993–1995 The Kosyu River, 1993–1995	речная / river	106	8+	29
Ваглейские озёра, 1995 Vagleyskiye lakes, 1995	озёрная / lake	8	6+	26
Водоёмы Большеземельской тундры / Water bodies of the Bolshezemelskaya tundra				
оз. Ватярты, 2001 Lake Vatyarty, 2001	озёрная / lake	67	11+	27
оз. Лангутаты, 2018 Lake Langutaty, 2018	озёрно-речная lake-river	41	10+	44
оз. Хоседаты, 2000 Lake Khosedaty, 2000	озёрная / lake	50	11+	16
оз. Колваты, 2011 Lake Kolvaty, 2011	озёрная / lake	13	10+	14
оз. Харбейты, 1998–1999 Lake Kharbeyty, 1998–1999	озёрная / lake	71	7+	32
Бассейны уральских притоков р. Печоры (предгорная область) Basins of the Ural tributaries of the Pechora River (foothill region)				
р. Кожим, 1993–1995 The Kozhim River, 1993–1995	речная / river	59	10+	13
р. Вангыр, 1993 The Vangyr River, 1993	речная / river	12	8+	23
р. Щугор, 1985–1989 The Shchugor River, 1985–1989	речная / river	157	8+	20
р. Илыч, 2014 The Ilych River, 2014	речная / river	50	9+	13
оз. Большое Кузьты, 2006 Lake Bolshoe Kuzty, 2006	озёрно-речная lake-river	35	5+	23

р. Большой Паток, 1999–2016 The Bolshoy Patok River, 1999–2016	речная / river	17	7+	22
р. Малый Паток, 2001–2007 The Maly Patok River, 2001–2007	озёрно-речная lake-river	46	9+	20
Озёрно-речная система р. Малый Паток / Lake-river system of the Maly Patok River				
Озеро № 2, 2001–2005 Lake No. 2, 2001–2005	озёрно-речная lake-river	26	13+	27
Озеро № 3, 2001–2017 Lake No. 3, 2001–2017	озёрно-речная lake-river	119	11+	32
Озеро № 4, 2001–2017 Lake No. 4, 2001–2017	озёрно-речная lake-river	62	11+	27
Озеро № 7, 2002–2012 Lake No. 7, 2002–2012	озёрная / lake	123	8+	17
Озеро № 9, 2004–2011 Lake No. 9, 2004–2011	озёрно-речная lake-river	38	21+	44 (26)
Озеро № 10, 2002–2011 Lake No. 10, 2002–2011	озёрно-речная lake-river	58	18+	39
Озеро № 11, 2002–2014 Lake No. 11, 2002–2014	озёрно-речная lake-river	99	11+	21
Озеро № 12, 2002–2014 Lake No. 12, 2002–2014	озёрно-речная lake-river	68	11+	24
Озеро № 13, 2002–2011 Lake No. 13, 2002–2011	временная temporary	134	10+	29

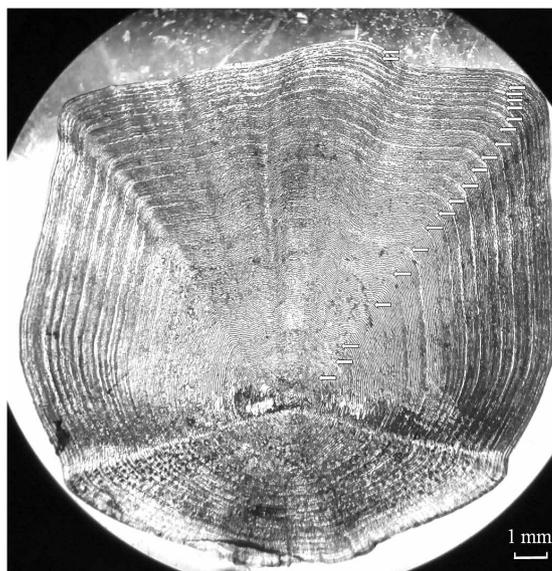


Рис. 2. Фотография чешуи сига из бассейна р. Малый Паток. Стрелками отмечены годовые кольца
Fig. 2. Photograph of whitefish scales from the Maly Patok River basin. The arrows indicate the annual rings

в бассейне р. Малый Паток, по-видимому, является максимальным для европейского северо-востока России.

Линейный рост исследованного экземпляра хорошо описывается уравнением Бергаланфи ($R^2=0,996$). Согласно этой модели, его размеры близки к предельной длине тела, определённой на основе результатов обратных расчислений роста данной особи ($L_{\infty}=705\pm 19$ мм).

Теоретический предельный возраст сига в данном водоёме, рассчитанный по двум другим параметрам уравнения Бергаланфи ($k=0,11\pm 0,01$; $t_0=0,02\pm 0,112$) с помощью формулы Тейлора [21, 22], составил около 26 лет.

Расчёты, проведённые по другим исследованным водоёмам, дают сходные результаты (табл.). Теоретический предельный возраст в разных водоёмах бассейна р. Печоры варьи-

рует от 12 до 44 лет (в среднем около 25 лет). При этом существенного различия по этому показателю между полупроходной и жилой формой сига не наблюдается.

Сходная величина максимальной продолжительности жизни получается, если при расчётах использовать семикратную длительность периода полового созревания (τ -период) [25]. Первые случаи полового созревания у сига в водоёмах бассейна р. Печоры отмечаются в возрасте 4+ – 5+ лет [10], следовательно, предельный возраст сига здесь может превышать 30 лет. Такие расчёты дают весьма приблизительную оценку, тем не менее, максимальные зарегистрированные показатели возраста печорского сига (17+ – 21+) могут достигать 70–80% от теоретических значений.

Однако, в каждом конкретном водоёме величина максимального возраста, отмеченного в период проведения исследований, сильно варьирует. Помимо климатических факторов и биологических особенностей той или иной группировки сига, его максимальный зарегистрированный возраст сильно зависит от промысловой смертности (интенсивности рыболовства). Так, в магистральном русле р. Печоры и крупных её притоках, более доступных для рыболовства (часто незаконного), возраст рыб в выборках не превышает 11+ (5+ – 11+) [26]. Омоложение возрастного состава под действием интенсивного рыболовства наблюдается и у лососеобразных рыб, обитающих в водотоках Среднего Тимана [27]. В менее доступных для рыболовов озёрах Большеземельской тундры отмечены особи возрастом 13+ (7+ – 13+) [10, 11]. В нижнем течении р. Щугор на состоянии группировки сига сказывается рыболовство на смежных участках русла р. Печоры; максимальный зарегистрированный возраст сига здесь составил 8+, в русле его притока – р. Малый Паток – 9+ лет [11]. В труднодоступных горных озёрах на водосборе этой реки могут встречаться экземпляры возрастом 11+ и старше (до 21+). Примечательно, что на территории России возраст сига, близкий к предельному (20+ и старше), за исключением оз. Байкал (21+), приводится для удалённых озёр плато Путорана (оз. Агата, оз. Северное, оз. Эпекли – до 25+), некоторых озёр Саян (до 23+) и оз. Таймыр (26+) [28].

Следует отметить, что определение возраста сига старших возрастных групп может сталкиваться с рядом методических трудностей. Существует мнение, согласно которому использование чешуи приводит к значительному занижению возраста рыб (особенно медленно

растущих половозрелых особей), по сравнению с данными, получаемыми при анализе отолитов [29–31]. С другой стороны, формирование на отолитах множества дополнительных колец может приводить к завышению возраста [32]. В итоге возраст сига, определённый по отолитам, часто не совпадает с оценками, выполненными по другим регистрирующим структурам (чешуя, плавниковые лучи) [33]. Кроме того, заметный вклад в погрешность оценки возраста могут вносить и индивидуальные особенности оператора [32]. С этих позиций следует особо подчеркнуть важность документального подтверждения возраста рыб, особенно в случаях, когда приводятся близкие к предельным оценки возраста.

Заключение

Таким образом, максимальный зарегистрированный возраст обыкновенного сига в труднодоступных водоёмах бассейна р. Печоры может превышать 20+ лет, теоретический предельный возраст оценивается в 25–30 лет. Данный показатель может использоваться в качестве «реперной точки» при оценке состояния популяций сига. По-видимому, основным фактором, ограничивающим продолжительность жизни сига в естественных водоёмах, является влияние рыболовства. Дальнейшие исследования рыбного населения удалённых водоёмов помогут уточнить пределы продолжительности жизни рыб и определяющих её разноуровневых адаптивных механизмов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Закономерности формирования, пространственно-структурной организации и динамики фауны и населения животных европейского северо-востока России и сопредельных арктических и бореальных территорий в изменяющихся условиях окружающей среды» № 125013101229-9.

References

1. Nikolsky G.V. The theory of fish stock dynamics as a biological basis for rational exploitation and reproduction of fish resources. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1974. 447 p. (in Russian).
2. Kuznetsova E.N., Bondarenko M.V., Morozov A.D. Age composition and growth rate of *Reinhardtius hippoglossoides* of the Norway-Barents Sea stock // Voprosy Ikhtiologii. 2001. V. 41. No. 2. P. 192–198 (in Russian).

3. Cailliet G.M., Andrews A.H. Age-validated longevity of fishes: Its importance for sustainable fisheries // Fisheries for Global Welfare and Environment: 5th World Fisheries Congress. Tokyo: Terrapub, 2008. P. 103–120.
4. Beverton R.J.H., Holt S.J. A review of the lifespans and mortality rates of fish in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics // The Lifespan of Animals (Colloquia on Aging): Ciba Foundation Symposium. V. 5. London: J. and A. Churchill Ltd., 1959. P. 142–180. doi: 10.1002/9780470715253.ch10
5. Beverton R.J.H. Longevity in fish: Some ecological and evolutionary considerations // Evolution of longevity in Animals / Eds. A.D. Woodhead, K.H. Thompson. Boston: Springer, 1987. P. 161–185. doi: 10.1007/978-1-4613-1939-9_12
6. Das M. Age determination and longevity in fishes // Gerontology. 1994. V. 40. No. 2–4. P. 70–96. doi: 10.1159/000213580
7. Munch S.B., Salinas S. Latitudinal variation in lifespan within species is explained by the metabolic theory of ecology // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2009. V. 106. No. 33. P. 13860–13864. doi: 10.1073/pnas.0900300106
8. Reshetnikov Yu.S. Ecology and systematics of whitefishes. Moskva: Nauka, 1980. 300 p. (in Russian).
9. Atlas of freshwater fish of Russia. V. 1. / Ed. Yu.S. Reshetnikov. Moskva: Nauka, 2002. 379 p. (in Russian).
10. Sidorov G.P., Reshetnikov Yu.S. Salmonid fish of the European Northeast water bodies. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. 346 p. (in Russian).
11. Sidorov G.P. Fish resources of the Bolshezemelskaya tundra. Leningrad: Nauka, 1974. 164 p. (in Russian).
12. Ponomarev V.I., Sidorov G.P. Review of ichthyological and fishery research in the Pechora River basin // Aquatic organisms in natural and transformed ecosystems of the European northeast. Syktyvkar: Izdatelstvo Komi NTs UrO RAN, 2002. P. 5–33 (in Russian).
13. Ponomarev V.I. Vertical distribution of ichthyofauna in lakes on the western slopes of the Subpolar and Polar Urals // Inland Water Biol. 2022. V. 15. No. 2. P. 149–159. doi: 10.1134/S1995082922020080
14. Ponomarev V.I. Aquatic fauna of water bodies in the Maly Patok River Basin (the Subpolar Urals). I. Fishes // Inland Water Biol. 2019. V. 12. No. 4. P. 384–392. doi: 10.1134/s1995082919040114
15. Kozmin A.K. Biology and stock status of whitefish-pijian *Coregonus lavaretus pidshian* (Gmelin, 1788) (Squad – the Salmoniformes, Family – Whitefish) in the river Pechora // Vestnik rybohozyajstvennoj nauki. 2016. V. 3. No. 2 (10). P. 27–38 (in Russian).
16. Pravdin I.F. Guide to the study of fish. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1966. 376 p. (in Russian).
17. Dgebuadze Yu. Yu., Chernova O.F. Teleost fish scale as a diagnostic and recording structure. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2009. 313 p. (in Russian).
18. Chugunova N.I. A Guide to studying the age and growth of fish. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1959. 164 p. (in Russian).
19. Dgebuadze Yu. Yu. Ecological aspects of fish growth variability. Moskva: Nauka, 2001. 276 p. (in Russian).
20. Mina M.V., Klevezal G.A. The growth of animals. Moskva: Nauka, 1976. 291 p. (in Russian).
21. Taylor C. Cod growth and temperature // ICES J. Mar. Sci. 1958. V. 23. No. 3. P. 366–370. doi: 10.1093/icesjms/23.3.366
22. Pauly D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks // ICES J. Mar. Sci. 1980. V. 39. No. 2. P. 175–192. doi: 10.1093/icesjms/39.2.175
23. FishBase / Eds. R. Froese, D. Pauly. World Wide Web electronic publication [Internet recourse] www.fishbase.org (Accessed: 06.06.2023).
24. Bolotova N.L., Ivanter E.V., Krivokhatsky V.A. Red Data Book of the Vologda Region. V. 3. Animals. Vologda: Polygraph-Kniga, 2010. 215 p. (in Russian).
25. Reshetnikov Yu.S. Phases of penetration of new species in freshwater ecosystems // Biology Bulletin Reviews. 2020. V. 140. No. 3. P. 294–305 (in Russian). doi: 10.31857/S0042132420030084
26. Boznak E.I., Ponomarev V.I. Population structure of European whitefish *Coregonus lavaretus* (Salmonidae: Coregoninae) from the lake–river system of the Subpolar Urals // J. Ichthyol. 2023. V. 63. No. 5. P. 950–961. doi: 10.1134/S003294522305003X
27. Zaharov A.B., Taskaev A.I. The problems of preserving and reconstructing water biological resources of the rivers of Central Timan // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 2. P. 83–91 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-2-083-091
28. Popov P.A. Fishes of Siberia: distribution, ecology, catch. Novosibirsk: Izdatelstvo NGU, 2007. 526 p. (in Russian).
29. Skurdal J., Vøllestad L.A., Qvenild T. Comparison of scales and otoliths for age determination of whitefish *Coregonus lavaretus* // Fish. Res. 1985. V. 3. P. 237–243. doi: 10.1016/0165-7836(85)90024-4
30. Maceina M.J., Boxrucker J., Buckmeier D.L., Gangl R.S., Lucchesi D.O., Iserman D.A., Jackson J.R., Martinez P.J. Current status and review of freshwater fish aging procedures used by state and provincial fisheries agencies with recommendations for future directions // Fisheries. 2007. V. 32. No. 7. P. 329–340. doi: 10.1577/1548-8446(2007)32[329:CSAROF]2.0.CO;2
31. Muir A.M., Ebener M.P., He J.X., Johnson J.E. A comparison of the scale and otolith methods of age estimation for lake whitefish in Lake Huron // North Am. J. Fish. Manage. 2008. V. 28. No. 3. P. 625–635. doi: 10.1577/M06-160.1
32. Raitaniemi J., Bergstrand E., Fløystad L., Hokki R., Kleiven E., Rask M., Reizenstein M., Saksgård R., Ångström C. The reliability of whitefish (*Coregonus lavaretus* (L.)) age determination – differences between methods and between readers // Ecol. Freshwater Fish. 1998. V. 7. No. 1. P. 25–35. doi: 10.1111/j.1600-0633.1998.tb00169.x
33. Herbst S.J., Marsden J.E. Comparison of precision and bias of scale, fin ray, and otolith age estimates for lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) in Lake Champlain // J. Great Lakes Res. 2011. V. 37. No. 2. P. 386–389. doi: 10.1016/j.jglr.2011.02.001

Мониторинг охраняемых видов на территории государственного природного заказника «Бушковский лес»

© 2025. О. Н. Пересторонина, к. б. н., доцент,
С. В. Шабалкина, к. б. н., доцент, Е. А. Домнина, к. б. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: olgaperest@mail.ru

На основании многолетних исследований (2004–2023 гг.) проведена актуализация данных о распространении редких и нуждающихся в постоянном контроле видов животных, растений и грибов на территории государственного природного заказника регионального значения «Бушковский лес». Это одна из крупных особо охраняемых природных территорий в Кировской области, которая предназначена для сохранения широколиственно-пихтово-еловых лесов региона со своеобразными флорой и фауной. На исследуемой территории выявлено семь видов животных, два вида сосудистых растений, два вида мха, четыре вида лишайников, один вид гриба, включённых в Красную книгу Кировской области. Из них пять видов – *Epipogium aphyllum* Sw., *Meesia longiseta* Hedwig, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758) – внесены в Красную книгу Российской Федерации. Из списка редких и уязвимых видов, которые нуждаются на территории области в постоянном контроле и наблюдении, отмечено четыре вида цветковых растений и восемь видов беспозвоночных животных. Подтверждение сохранности ранее отмеченных редких видов и обнаружение новых свидетельствуют о высокой природоохранной эффективности заказника «Бушковский лес».

Ключевые слова: биоразнообразие, Красная книга, особо охраняемая природная территория, статус редкости, редкий вид, таксон.

Monitoring of protected species on the territory of Bushkovskiy forest State Nature Reserve

© 2025. O. N. Perestoronina ORCID: 0000-0002-1051-2195,
S. V. Shabalkina ORCID: 0000-0002-6157-1312,
E. A. Domnina ORCID: 0000-0002-5063-8606,
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: olgaperest@mail.ru

Based on long-term studies (2004–2023), the data on the distribution of rare and in need of constant monitoring of animal, plant and fungi species in the territory of Bushkovskiy forest State Nature Reserve of regional significance was updated. The Bushkovskiy forest Reserve is located in the Urzhumskiy district of the Kirov Region. The territory was not glaciated and retained a dense gully network. There is a hydrological natural monument “Shaitan Lake” within the reserve. Many small rivers flow through the forest. The above Nature Reserve is one of the largest specially protected natural areas in the Kirov Region, which is intended to preserve the region’s broad-leaved fir-spruce forests with their unique flora and fauna. Seven animal species, two vascular plant species, two moss species, four lichen species, and one fungus species included in the Red Data Book of the Kirov Region were identified in the studied area. Of these, five species – *Epipogium aphyllum* Sw., *Meesia longiseta* Hedwig, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758) – are listed in the Red Data Book of the Russian Federation. Four species of Angiospermae and eight species of Invertebrata were identified from the list of rare and vulnerable species that need constant monitoring in the region. The confirmation of the conservation of previously noted rare species and the discovery of new ones indicate the high conservation effectiveness of the Bushkovskiy forest Nature Reserve.

Keywords: biodiversity, Red Data Book, specially protected natural area, rarity status, rare species, taxon.

Прогресс современной цивилизации связан с непрерывным возрастанием негативных воздействий на природу и развитием в условиях экологического кризиса, сопровождающимся сокращением биоразнообразия. Происходит разрушение естественного механизма саморегуляции и стабилизации окружающей среды, ко-

торые обеспечиваются природными экосистемами.

Уникальное биологическое разнообразие России защищается системой особо охраняемых природных территорий (ООПТ), которые играют огромную роль в поддержании и сохранении естественных сообществ и экологии регионов [1, 2].

В Кировской области сеть охраняемых территорий представлена 152 единицами, совокупная доля которых составляет 3,13% от общей площади региона [3]. Одной из заметных ООПТ является государственный природный заказник (ГПЗ) регионального значения «Бушковский лес», который расположен в Уржумском районе, у северной границы подзоны подтаёжных лесов. Основными задачами функциональной деятельности этого ГПЗ являются сохранение и создание условий для возобновления растительных сообществ, видов, подвидов и популяций охраняемых, редких и исчезающих растений, видов, ценных в хозяйственном отношении; сохранение и создание условий для воспроизводства и расселения на сопредельные территории объектов животного мира, отнесённых к категории охраняемых, редких, исчезающих [4].

Для эффективного выполнения любой ООПТ своих функций необходимы регулярная инвентаризация, планомерные комплексные и систематические наблюдения. Цель настоящей работы – обобщение данных о распространении редких и нуждающихся в постоянном контроле видов животных, растений и грибов на территории заказника «Бушковский лес» по результатам многолетних исследований.

Материалы и методы исследования

Основными материалами для работы стали результаты многолетнего (на протяжении 2004–2023 гг.) изучения видового и экологического разнообразия ГПЗ «Бушковский лес».

Обследуемый заказник, площадью 9274,8 га, находится на территории Буйского лесничества Уржумского лесхоза Кировской области [4]. С юга он граничит с Республикой Марий Эл, на западе – с Лебяжским районом Кировской области.

Бушковский лес расположен на Уржумском водораздельном плато Вятского Увала, покрытого дерновыми, супесчаными и серыми лесными почвами [5]. Территория не подвергалась ледниковому покрытию [6] и сохранила густую балочную сеть. В пределах заказника находится гидрологический памятник приро-

ды «Озеро Шайтан»; по лесу протекает много мелких речек: Мазарка, Сьюбинка, Водовойка и др.

Растительность ГПЗ «Бушковский лес» относится к хвойно-широколиственным лесам Илетско-Вятского геоботанического округа Камско-Печёрско-Западноуральской подпровинции Урало-Западносибирской провинции [7]. Зональными типами растительных сообществ являются хвойно-широколиственные леса, которые характеризуются преобладанием или значительной примесью широколиственных видов деревьев, богатством подлеска, доминированием в травяно-кустарничковом ярусе дубравного широколиственного покрова, слабым развитием мохового покрова [8]. Эти фитоценозы представляют большой научный интерес, поскольку располагаются на северо-восточном пределе распространения этого типа растительности. Кроме того, территория Бушковского леса включается в северные части ареалов (иногда здесь проходит граница распространения) многих южных видов, в частности – степных и лесостепных видов животных и неморальных видов растений.

В соответствии со статусом ООПТ, на территории природного заказника постоянно или временно запрещаются или ограничиваются отдельные виды хозяйственной деятельности, которые противоречат целям и задачам организации ГПЗ «Бушковский лес», оказывают прямое или косвенное отрицательное воздействие на его природные комплексы и объекты. Выделены модельные кварталы, в которых отменена любая хозяйственная и лесохозяйственная деятельность (в том числе санитарные рубки) – это места обитания и произрастания редких и исчезающих видов животных и растений: кварталы 20, 24, 52, 59, 60, 62, 70, 78, 81, 85, 86, 96, 97, 122 Буйского лесничества Уржумского лесхоза [4].

Работу проводили по общепринятым методикам [9–13], выполнено более 80 геоботанических описаний растительных сообществ на временных пробных площадях, проведены флористические и фаунистические исследования, оценено состояние популяций преимущественно редких видов. Каждую находку охраняемого таксона фиксировали при помощи GPS-навигатора Garmin 62. Некоторые сведения о составе и состоянии биоты ГПЗ «Бушковский лес» опубликованы ранее [8, 14–19].

В этой работе при характеристике редкого вида указывали статус, местонахождение, состояние популяции и основные угрозы. На-

звания таксонов представлены в соответствии с употребляемой в настоящее время биологической номенклатурой [20–24]. При указании категории статуса редкости вида руководствовались Красными книгами Российской Федерации [25, 26] и Кировской области [27].

Результаты и обсуждение

Государственный природный заказник «Бушковский лес» отличается своеобразным составом биоты, который сложился и продолжает формироваться в результате действия комплекса факторов.

Растения. Флора Бушковского леса включает 270 видов сосудистых растений, относящихся к 196 родам и 73 семействам [19]. Её основу составляют Magnoliopsida. Бриофлора изучена хуже: установлено 9 родов из 7 семейств [8]. Это преимущественно бореальные виды, доминирующие в лесных, болотных и луговых ценозах.

Среди покрытосеменных встречается два вида из семейства Orchidaceae, включённых в Красную книгу Кировской области [27]: *Neottia nidus-avis* (L.) Rich. и *Epipogium aphyllum* Sw.

Epipogium aphyllum – редкий в недавнем прошлом вид, численность которого быстро сокращается, имеет 2 категорию статуса редкости. Включён в Красную книгу Российской Федерации [26]. На территории заказника выявлено два местообитания: в 2018 г. – елово-берёзово-липовый разнотравный лес, в 2021 г. – липняк щитовниково-снытевый. Ценопопуляции (ЦП) малочисленные: первая образована пятью генеративными особями, высота побегов которых варьировала от 12,5 до 23,5 см, число цветков – 1–3. Вторая ЦП представлена также пятью генеративными особями. Растение ведёт подземный образ жизни, появляется на поверхности земли только во время цветения раз в 5–7 лет, возможно спустя и 20 лет [28]. Поэтому выявить этот вид и оценивать динамику ЦП в последующем достаточно сложно.

Для *Epipogium aphyllum* характерна узкая экологическая амплитуда: растение чрезвычайно требовательно к условиям местообитаний. Предпочитает тенистые и сырые леса, средне и богатые гумусом почвы, от сильно увлажнённых до влажных, со слабнокислым и нейтральным pH [28]. Основной угрозой для существования выявленных ЦП является нарушение местообитаний, в частности, в результате рубок промежуточного пользования, которые разрешены в отдельных кварталах, в том числе в кварталах

40 и 91, где произрастает *Epipogium aphyllum*. Вторая угроза – рекреация и сбор в связи с тем, что кварталы расположены рядом с с. Индыгойка (Лебяжский район). Ценопопуляции обычно малочисленные. Для вида естественными факторами и угрозами являются ветровалы и пожары, приводящие к резкому изменению микроклимата.

Neottia nidus-avis – редкий, малочисленный вид в Кировской области, имеет 3 категорию статуса редкости. В ГПЗ «Бушковский лес» *N. nidus-avis* выявлена впервые в 2023 г. в липняке злаково-снытевом (квартал 97). Ценопопуляция малочисленная, образована двумя генеративными особями. Вид имеет узкую экотопологическую приуроченность: предпочитает густые тенистые леса со слабо развитым травяным покровом; богатые почвы, с рыхлой хорошо гумусированной подстилкой, с pH от нейтрального до щелочного [28]. Лимитирующие факторы – ветровалы и пожары, приводящие к резкому изменению микроклимата. Угроза для произрастания *N. nidus-avis*, обусловленная антропогенными причинами, в настоящее время на территории заказника отсутствует.

По результатам анализа фондовых материалов и полевых исследований выявлено два редких вида Bryophyta для Кировской области. Один из них – *Meesia longiseta* Hedwig из семейства Meesiaceae, занесённый в Красную книгу Российской Федерации [26], – на территории заказника описан в первой трети XX века [29]. Однако, за последние 20 лет исследований этот вид не отмечался.

Второй вид – *Neckera pennata* Hedwig из семейства Neckeraeae – имеет 3 категорию статуса редкости. Мох произрастает в пределах 37 кварталов на стволах *Tilia cordata* Mill., *Ulmus glabra* Huds. и значительно реже – *Populus tremula* L. в различных типах растительных сообществ: 1) липняки – снытевый, папоротниковый с крупным широкотравьем, пролесниково-снытевый, разнотравный, снытево-страусниковый, страусниковый, снытево-крапивный, медуницево-щитовниково-снытевый, страусниково-разнотравный, страусниково-снытевый, пролесниковый; 2) берёзово-липовые леса – снытевый, хвощово-снытевый, страусниково-снытевый; 3) елово-липовые леса – снытево-страусниковый, снытевый; 4) елово-берёзово-липовые леса – разнотравный, страусниково-снытевый, снытево-страусниковый; 5) елово-пихтово-липовый лес снытевый; 6) осиново-липовый лес страусниково-снытевый.

Популяции *Neckera pennata* на территории заказника крупные, многочисленные, присутствуют генеративные счётные единицы (со спорогонами); на стволах отдельных деревьев произрастает массово. Состояние ЦП за последний пятилетний период не изменилось, стабильное; процессы возобновления не нарушены, наблюдается вегетативное размножение и спорами. У вида узкая экологическая приуроченность: необходимы стволы живых старых деревьев в старовозрастных лесах. Естественные факторы угрозы в настоящее время – отмирание старых деревьев, ветровалы и пожары, приводящие к резкому изменению микроклимата. Главной угрозой для существования выявленных ЦП, обусловленной антропогенными причинами, является вырубка старых деревьев *Tilia cordata* и *Ulmus glabra*. Она возможна в ходе рубок промежуточного пользования на территории большинства кварталов, в которых произрастает *Neckera pennata*.

Из списка редких и уязвимых видов животных, растений и грибов, не внесённых в Красную книгу, но нуждающихся на территории области в постоянном контроле и наблюдении [27], отмечено четыре вида цветковых растений: *Campanula trachelium* L., *Campanula persicifolia* L., *Convallaria majalis* L., *Platanthera bifolia* (L.) Rich. На территории заказника отмечено две ЦП *Campanula trachelium* в липняках папоротниково-снытевом и берёзово-еловом разнотравном. *Campanula persicifolia* встречается в сосняке разнотравном и в составе прибрежной растительности р. Мазарка; *Platanthera bifolia* – вдоль лесной дороги в берёзово-еловом разнотравном сообществе и сосняке разнотравном. Ценопопуляции всех видов малочисленные, состояние их удовлетворительное, присутствуют генеративные и вегетативные особи. Основными угрозами для произрастания видов являются сбор на букеты и выкопка для пересадки в сады.

Лишайники и грибы. Лихенобиота заказника содержит 71 таксон эпифитных лишайников, включённых в 20 родов, 12 семейств и 6 порядков. Обследование биоразнообразия Бушковского леса, предстоящее приданию территории охранного статуса, выявило четыре редких вида. Ранее были отмечены *Ramalina elegans* (Bagl. & Carestia) Jatta, *Ramalina baltica* Lettau, *Evernia divaricata* (L.) Ach., которые имеют 3 категорию статуса редкости [8]. Однако, за последние 10 лет исследований данные виды не выявлены.

Мониторинговые исследования проводили за *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. – видом

со 2 категорией статуса редкости, включённым в Красную книгу Российской Федерации [26]. В пределах заказника лишайник произрастает на стволах *Tilia cordata* в различных типах липняков, в берёзово-липовых, елово-берёзово-липовых, елово-пихтово-липовых, елово-липовых, осиново-липовых, липово-берёзовых лесах. В травяно-кустарничковом ярусе чаще всего доминируют *Aegopodium podagraria* L. и *Matteuccia struthiopteris* (L.) Tod. Талломы встречаются на деревьях возрастом 60 и более лет, с диаметром ствола от 19 до 92 см (средний – 41,5 см). При этом *Lobaria pulmonaria* отмечена только на наклонных, изогнутых, поросших мхами стволах. Наиболее часто сопутствует ей *Neckera pennata*.

Популяция *Lobaria pulmonaria* в ГПЗ «Бушковский лес» молодая, соотношение (%) талломов прегенеративного, генеративного и постгенеративного периодов составляет соответственно 95,8 : 3,6 : 0,6. Большая часть талломов находится в виргинильном онтогенетическом состоянии (v1, v2a), которое характеризуется взрослым обликом таллома со сформированными лопастями и долями, отчётливо выраженными ямчатыми углублениями и рёбрами, наличием соредиев. Очень малое количество талломов зафиксировано в сенильном состоянии (0,6%) и отсутствуют в субсенильном состоянии. Размерная структура свидетельствует о преобладании талломов среднего размера: средняя длина и ширина составляют соответственно 5,94±0,23 см и 5,62±0,21 см.

При организации заказника было выявлено шесть кварталов (52, 59, 60, 62, 70, 90), в которых отмечено местонахождение *Lobaria pulmonaria* [8]. При последующих исследованиях лишайник обнаружен ещё в 20 кварталах. Численность в местах находок обычно невысокая; тенденции к увеличению площади популяций не выявлено. Главные природные лимитирующие факторы: чувствительность к изменению режима увлажнения и освещения; узкая экологическая приуроченность вида (необходимы стволы живых старых деревьев в старовозрастных лесах); отмирание старых деревьев; ветровалы и пожары, приводящие к резкому изменению микроклимата. К гибели лишайника приводят рубки, в том числе и выборочные, при которых существенно нарушаются условия микроклимата.

Микобиота на территории ГПЗ «Бушковский лес» не изучена. Однако, во время мониторинговых исследований в 2014 г. было обнаружено два плодовых тела *Ganoderma*

lucidum (Curtis) P. Karst. вдоль просеки в елово-липовом лесу (109 квартал) [30]. В Кировской области этот вид находится под угрозой исчезновения, имеет 1 категорию статуса редкости [27]; охраняется на всей территории России (3 категория) [26]. Основные угрозы носят антропогенный характер, которые приводят к нарушению местообитаний: вырубка старовозрастных лесов; пожары; удаление крупномерного валежа и др.

Животные. В ГПЗ «Бушковский лес» выявлено обитание 153 видов животных, характерных для лесной зоны: моллюсков – 3 вида, членистоногих – 95, рыб – 12, земноводных – 5, пресмыкающихся – 1, птиц – 24, млекопитающих – 13 [10].

Из позвоночных животных редким является *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758) из отряда Salmoniformes. Вид имеет 2 категорию статуса редкости, включён в Красную книгу Российской Федерации [25]. Обитает в небольших речках с чистой водой и быстрым течением. Сведения о его присутствии в настоящее время на территории заказника противоречивы: по опросам местного населения *Thymallus thymallus* не попадает в уловах рыбы на р. Мазарка, что, однако, не может свидетельствовать об отсутствии его в ГПЗ «Бушковский лес», где вылов рыбы запрещён. Особи очень требовательны к чистоте воды; при загрязнении рек сохраняется лишь в верховьях и притоках, где может исчезнуть в результате обмеления или нарушения гидрологического режима при вырубке лесов [27]. Угрожающим фактором также является браконьерство.

К редким видам с 3 категорией статуса, обитающим на территории заказника, относится *Botaurus stellaris* (Linnaeus, 1758) из отряда Ciconiiformes. По опросным данным охотников гнездится в заболоченном участке леса с зарослями *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. [8]. Основными угрозами могут быть затопление гнёзд при резком повышении уровня воды; случайный отстрел; разорение гнёзд и гибель птенцов [27].

Среди редких беспозвоночных животных выявлены три вида Gastropoda и два вида Insecta с 3 категорией статуса редкости. *Bulgarica cana* (Held, 1836) в Бушковском лесу встречается единично на стволах лип среди эпифитных мхов и лишайников, валеже и трухлявых пнях в 60, 70, 91, 92 кварталах. Численность низкая, распространение особей мозаичное: отмечены в различных, удалённых друг от друга местообитаниях заказника. Состояние популяции стабильное: *Bulgarica cana*

фиксируется с момента обоснования ООПТ по настоящее время. В сходных местообитаниях единично встречается *Cochlodina laminata* (Montagu, 1803): найдена в моховом покрове стволов лип, под гнилой корой валежа, на трухлявых пнях в 60, 94 кварталах. Численность также низкая, распространение мозаичное, состояние популяции стабильное.

В 2023 г. находками подтверждено обитание *Ena montana* (Draparnaud, 1801) [18], наличие которой фиксировалось и на момент создания охраняемой территории. Встречается моллюск единично в подстилке, под гнилой корой валежа липы, выползает на стволы и листья деревьев, кустарников. Численность низкая, распространение мозаичное: в четырёх удалённых друг от друга кварталах (60, 67, 70, 92) заказника. Состояние популяции стабильное.

В Кировской области находится северная периферия ареалов найденных в ГПЗ «Бушковский лес» видов моллюсков, распространение популяций приурочено к хвойно-широколиственным лесам [27]. Угрозу может представлять сокращение площадей лесных насаждений заказника.

В 2023 г. подтверждено пребывание *Protaetia marmorata* (Herbst, 1786) из отряда Coleoptera, которая встречается единичными особями на опушках и лесных полянах. Популяция малочисленная: на территории заказника отмечена вдоль просеки между 78 и 86 кварталами. Основными угрозами являются вырубка старых дуплистых деревьев лиственных пород, удаление сухостоя и валежа, раскорчёвка пней.

Также в 2023 г. подтверждено наличие охраняемого вида *Parnassius mnemosyne* (Linnaeus, 1758) из отряда Lepidoptera. Популяции малочисленны; единичные особи встречены на опушках, полянах и вдоль просек лиственных лесов в 62, 72, 78, 86 кварталах. Приурочены к местам произрастания *Corydalis* DC. – кормового растения гусениц. Лимитирующими факторами являются ограниченность подходящих биотопов с кормовым растением; трансформация местообитаний с *Corydalis*, открытых и лугово-опушечных участков.

Из списка редких и уязвимых таксонов, которые нуждаются на территории области в постоянном контроле и наблюдении, за 20-летний период исследований биоты и по данным [8, 14–16, 18] отмечено 8 видов беспозвоночных животных (табл.). Найдены они преимущественно на опушках лесов, полянах, вдоль просек, по местам вырубков. Встречаются

Виды животных, включённых в Приложение 2 Красной книги Кировской области
Animal species included in Appendix 2 of the Red Data Book of the Kirov Region

№ No.	Название вида / Species	Год находок / Year of finds
1	<i>Iphiclides podalirius</i> (Linnaeus, 1758)	2004, 2023
2	<i>Apatura iris</i> (Linnaeus, 1758)	2004, 2018, 2021
3	<i>Argynnis laodice</i> (Pallas, 1771)	2004
4	<i>Coenonympha hero</i> (Linnaeus, 1761)	2021
5	<i>Melanargia russiae</i> (Esper, 1783)	2021
6	<i>Colias palaeno</i> (Linnaeus, 1761)	2021
7	<i>Lycaena alciphron</i> (Rottenburg, 1775)	2021
8	<i>Chlorophorus herbsti</i> (Brahm, 1790)	2018

редко, единично. Основные лимитирующие факторы – северная граница ареала (*Iphiclides podalirius*); сокращение площади широколиственных лесов с кормовыми растениями; трансформация местообитаний; лесные пожары; сбор некоторых видов в связи с высокой декоративностью и др.

Заключение

В итоге обобщения данных на 2023 г. на территории ГПЗ «Бушковский лес» выявлено 16 видов, включённых в Красную книгу Кировской области, пять из которых внесены в Красную книгу Российской Федерации. Один вид (*Ganoderma lucidum*) имеет 1 категорию статуса редкости, три вида (*Epipogium aphyllum*, *Lobaria pulmonaria* и *Thymallus thymallus*) – 2, остальные (12 видов) – 3. Из списка редких и уязвимых видов, которые нуждаются на территории области в постоянном контроле и наблюдении, отмечено 12.

Результаты по выявлению наличия и состояния популяций охраняемых видов на территории заказника доказывают важность проводимых регулярных исследований биоты. Подтверждение сохранности ранее отмеченных редких видов и обнаружение новых (*Neotia nidus-avis*, *Epipogium aphyllum*, *Platanthera bifolia* и др.) свидетельствуют о том, что ГПЗ «Бушковский лес» успешно справляется с возложенными на него природоохранными задачами.

Для организации более действенной охраны редких и нуждающихся в постоянном контроле видов, в связи с полученными новыми данными, целесообразно расширить территорию заказника, изъятую из хозяйственного и лесохозяйственного использования, и включить в неё 31, 32, 40, 57, 66, 67, 91, 119, 120, 126 кварталы.

Литература

- Сергиенко В.Г. Разнообразие растительных сообществ и флоры заказника «Кургальский» // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2013. № 3. С. 49–55.
- Рябов В.М., Рябова Е.В., Ашихмина Т.Я. Оценка биоразнообразия как механизм изменения статуса особо охраняемых природных территорий // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 111–117. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117
- О состоянии окружающей среды Кировской области в 2023 году: Региональный доклад / Под общей редакцией Т.Э. Абашева. Киров, 2024. 191 с.
- Постановление Правительства Кировской области от 03.07.2007 № 99/281 (ред. от 16.02.2016) «О создании государственного природного заказника регионального значения "Бушковский лес"» [Электронный ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/973017290> (Дата обращения: 16.08.2024).
- Прокашев А.М. Почвы Вятского края. Киров: Киров. гос. пед. ин-т, 1992. 85 с.
- Кузницын М.А. Геоморфологические районы // Энциклопедия земли Вятской. Т. 7. Природа. Киров, 1997. С. 137–141.
- Растительность европейской части СССР / под ред. С.А. Грибановой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1980. 429 с.
- Савиных Н.П., Киселёва Т.М., Пересторонина О.Н., Копысов В.А., Шабалкина С.В., Лелекова Е.В. Государственный природный заказник регионального значения «Бушковский лес» // Экскурсии по памятникам природы г. Кирова и области. Ч. 2 / Под общ. ред. И.М. Зарубиной, В.М. Рябова, Е.В. Рябовой. Киров: ОАО «Кировская областная типография», 2007. С. 131–141.
- Программа и методика наблюдений за ценопопуляциями видов растений Красной книги СССР / Под ред. Л.В. Денисовой, С.В. Никитиной, Л.Б. Заугольной. М.: ВНИИприроды, 1986. 34 с.
- Методы изучения лесных сообществ / Отв. ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.

11. Павлинов И.Я., Крусков С.И., Варшавский А.А., Борисенко А.А. Наземные животные России. Справочник-определитель. М.: изд-во КМК, 2002. 298 с.
12. Система мониторинговых наблюдений за состоянием биоты на территории Свердловской области / Отв. ред. И.А. Кузнецова. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2005. 205 с.
13. Игнатенко Р.В., Тарасова В.Н. Оценка состояния лишайника лобария легочная (*Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm.) в лесных сообществах с разной давностью нарушения на северо-западе Европейской России // Экология. 2018. № 4. С. 245–253. doi: 10.7868/S0367059718040017
14. Пестов С.В. К фауне членистоногих заказника «Бушковский лес» // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Кн. 1. Киров: ВятГУ, 2014. С. 207–209.
15. Кулакова О.И., Пестов С.В. Булавоусые чешуекрылые (Lepidoptera: Rhopalocera) заказника «Бушковский лес», Кировская область // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Кн. 2. Киров: ВятГУ, 2018. С. 172–175.
16. Мазеева А.В., Кулакова О.И., Татаринцов А.Г. Видовое разнообразие булавоусых чешуекрылых (Lepidoptera) заказника «Бушковский лес» (Кировская область) // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: ВятГУ, 2021. С. 368–373.
17. Домнина Е.А., Шабалкина С.В. Онтогенетическая структура популяции *Lobaria pulmonaria* на территории государственного природного заказника «Бушковский лес» (Кировская область) // Лишайники: от молекул до экосистем: материалы докладов Международной конференции. Сыктывкар, 2024. С. 29–30.
18. Ходырев Г.Н. О встречах редких видов беспозвоночных в заказнике «Бушковский лес» в 2023 году // Материалы VI межрегиональных зоологических чтений, посвящённых памяти учёного-естествоиспытателя С.В. Маракова (1929–1986). Киров: Аверс, 2024. С. 91–95.
19. Shabalkina S., Perestoronina O. Floristic diversity of the state natural sanctuary “Bushkovskiy forest” (the Kirov region, Russia) // E3S Web of Conferences. 2024. V. 539. Article No. 01035. doi: 10.1051/e3sconf/202453901035
20. Игнатов М.С., Афонина О.М., Игнатова Е.А. Список мхов восточной Европы и Северной Азии // Arctoa. 2006. № 15. С. 1–130.
21. Львовский А.Л., Моргун Д.В. Булавоусые чешуекрылые Восточной Европы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007. 443 с.
22. The Angiosperm Phylogeny Group, Chase M.W., Christenhusz M.J.M., Fay M.F., Byng J.W., Judd W.S., Soltis D.E., Mabberley D.J., Sennikov A.N., Soltis P.S., Stevens P.F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV // Bot. J. Linn. Soc. 2016. V. 181. No. 1. P. 1–20. doi: 10.1111/boj.12385
23. Westberg M., Moberg R., Myrdal M., Nordin A., Ekman S. Santesson’s Checklist of Fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi. Uppsala University: Museum of Evolution, 2021. 938 p.
24. POWO: Plants of the World Online. 2024 [Электронный ресурс] <https://powo.science.kew.org/> (Дата обращения: 02.10.2024).
25. Красная книга Российской Федерации. Животные / Отв. ред. Д.С. Павлов. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. 1128 с.
26. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / Отв. ред. Д.В. Гельтман. М.: ВНИИ «Экология», 2024. 944 с.
27. Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы / Под ред. О.Г. Барановой, Е.П. Лачохи, В.М. Рябова, В.Н. Сотникова, Е.М. Тарасовой, Л.Г. Целищевой. Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. 336 с.
28. Вахрамеева М.Г., Варлыгина Т.И., Татаренко И.В. Орхидные России (биология, экология и охрана). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 437 с.
29. Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы / Отв. ред. Л.Н. Добринский, Н.С. Корытин. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2001. 288 с.
30. Трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum*). [Электронный ресурс] <https://www.inaturalist.org/observations/166198087> (Дата обращения: 02.10.2024).

References

- Sergiyenko V.G. Diversity of plant communities and flora in reserve “Kurgalskiy” // Proceedings of the St. Petersburg forestry research institute. 2013. No. 3. P. 49–55 (in Russian).
- Ryabov V.M., Ryabova E.V., Ashikhmina T.Ya. Assessment of biodiversity as a mechanism for changing the status of specially protected natural areas // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 111–117 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117
- On the state of the environment of the Kirov region in 2023: Regional report / Ed. T.E. Abashev. Kirov, 2024. 191 p. (in Russian).
- Resolution of the Kirov region Government dated July 3, 2007 No. 99/281 (as amended on February 16 2016) “On the establishment of the State Nature Reserve of regional significance “Bushkovskiy forest” [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/973017290> (Accessed: 16.08.2024) (in Russian).

5. Prokashev A.M. Soils of the Vyatka region. Kirov: Kirovskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy institut, 1992. 85 p. (in Russian).
6. Kuznitsyn M.A. Geomorphological regions // Encyclopedia of the Vyatka land. V. 7. Nature. Kirov, 1997. P. 137–141 (in Russian).
7. Vegetation of the USSR European part/ Eds. S.A. Griбанова, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).
8. Savinykh N.P., Kiseleva T.M., Perestoronina O.N., Kopysov V.A., Shabalkina S.V., Lelekova E.V. State nature reserve of regional significance “Bushkovskiy forest” // Excursions to natural monuments of Kirov and the region. Part 2 / Eds. I.M. Zarubina, V.M. Ryabov, E.V. Ryabova. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2007. P. 131–141 (in Russian).
9. Program and methodology for observing cenopopulations of plant species from the USSR Red Data Book / Eds. L.V. Denisova, S.V. Nikitina, L.B. Zaugolnova. Moskva: VNIIPripody, 1986. 34 p. (in Russian).
10. Methods for forest community study / Eds. V.T. Yarmishko, I.V. Lyanguzova. Sankt-Peterburg: NIIKhimii SPbGU, 2002. 240 p. (in Russian).
11. Pavlinov I.Ya., Krusko S.I., Varshavsky A.A. Terrestrial Russian Mammalia. Reference book – determinant. Moskva: Izdatelstvo KMK, 2002. 298 p. (in Russian).
12. System of monitoring observations of the state of biota in the territory of Sverdlovsk region / Ed. I.A. Kuznetsova. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2005. 205 p. (in Russian).
13. Ignatenko R.V., Tarasova V.N. Assessment of the state of lung lichen, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., in forest communities with different times since disturbance in the Northeast of European Russia // *Ekologiya*. 2018. No. 4. P. 245–253 (in Russian). doi: 10.7868/S0367059718040017
14. Pestov S.V. On the fauna of arthropods of the nature reserve “Bushkovskiy forest” // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Book 1. Kirov: Vesi, 2014. P. 207–209 (in Russian).
15. Kulakova O.I., Pestov S.V. Club-horned Lepidoptera (Lepidoptera: Rhopalocera) of the Bushkovskiy Forest nature reserve, Kirov region // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Book 2. Kirov: VyatGU, 2018. P. 172–175 (in Russian).
16. Mazeeva A.V., Kulakova O.I., Tatarinov A.G. Species diversity of Lepidoptera in the Bushkovskiy Forest nature reserve (Kirov region) // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: materialy XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Kirov: VyatGU, 2021. P. 368–373 (in Russian).
17. Domnina E.A., Shabalkina S.V. Ontogenetic structure of the *Lobaria pulmonaria* population the territory of the Bushkovskiy Forest nature reserve (Kirov region) // Lichens: from molecules to ecosystems: International Conference Proceedings. Syktyvkar, 2024. P. 29–30 (in Russian).
18. Khodyrev G.N. Encounters of rare invertebrate species in the Bushkovskiy Forest nature reserve in 2023 // Materialy VI mezhregional'nykh zoologicheskikh chteniy, posvyashchennykh pamyati uchonogo-yestestvoispytatelya S.V. Marakova (1929–1986). Kirov: Avers, 2024. P. 91–95 (in Russian).
19. Shabalkina S., Perestoronina O. Floristic diversity of the state natural sanctuary “Bushkovskiy forest” (the Kirov region, Russia) // E3S Web of Conferences. 2024. V. 539. Article No. 01035. doi: 10.1051/e3sconf/202453901035
20. Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A. Checklist of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. 2006. V. 15. P. 1–130 (in Russian).
21. Lvovsky A.L., Morgun D.V. Club-horned Lepidoptera of Eastern Europe (Key to the flora and fauna of Russia). Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2007. 443 p. (in Russian).
22. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV // *Bot. J. Linn. Soc.* 2016. V. 181. No. 1. P. 1–20. doi: 10.1111/boj.12385
23. Westberg M., Moberg R., Myrdal M., Nordin A., Ekman S. Santesson’s Checklist of Fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi. Uppsala University: Museum of Evolution, 2021. 938 p.
24. POWO: Plants of the World Online. 2024 [Internet resource] <https://powo.science.kew.org/> (Accessed: 02.10.2024).
25. Red Data Book of the Russian Federation. Animals. Moskva: FGBU “VNII Ekologiya”, 2021. 1128 p. (in Russian).
26. Red Data Book of the Russian Federation. Plants and Fungi / Ed. D.V. Geltman. Moskva: VNII “Ekologiya”, 2024. 944 p. (in Russian).
27. Red Data Book of the Kirov region: animals, plants, mushrooms / Eds. O.G. Baranova, E.P. Lachokha, V.M. Ryabov, V.N. Sotnikov, E.M. Tarasova, L.G. Tselishcheva. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2014. 336 p. (in Russian).
27. Vakhrameeva M.G., Varlygina T.I., Tatarenko I.V. Orchids of Russia (biology, ecology and protection). Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. 437 p. (in Russian).
29. Red Data Book of the Kirov region: animals, plants, mushrooms / Eds. L.N. Dobrinsky, N.S. Korytin. Ekaterinburg: Izdatelstvo Ural'skogo universiteta, 2001. 288 p. (in Russian).
30. *Ganoderma lucidum* [Internet resource] <https://www.inaturalist.org/observations/166198087> (Accessed: 02.10.2024).

Специфика почвенной альгоцианофлоры в условиях антропогенного воздействия

© 2025. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,

Н. В. Сырчина², к. х. н., с. н. с.,

И. А. Кондакова², к. фил. н., доцент,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: ecolab2@gmail.com

Альгоцианофлора является важнейшим компонентом населяющей почву микробиты. Интенсивное антропогенное воздействие приводит к значительной трансформации естественных микробиологических сообществ, что вызывает ряд негативных последствий. Сравнительное изучение видового состава микрофототрофов, населяющих почвы с разным характером антропогенного воздействия (1 – почвы заповедника; 2 – почвы техногенной территории; 3 – почвы сельскохозяйственных предприятий), показало, что наиболее богатым видовым составом микрофототрофов отличались почвы заповедной территории. Обработка почвы и внесение в избыточных количествах свиных навозных стоков привело к снижению биоразнообразия микрофототрофов на 30%. В условиях техногенной нагрузки биоразнообразие снизилось почти на 50%. Наиболее высокую толерантность к антропогенной нагрузке проявили: *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta). Наименее устойчивыми к антропогенному давлению оказались охрофитовые микроводоросли, наиболее устойчивыми – зелёные. На сообщества почвенных микрофототрофов существенное влияние оказал техногенный фактор. На участке, испытывающем техногенную нагрузку, видовое разнообразие микрофототрофов по сравнению с контролем меньше почти в два раза. В относительно богатых элементами питания растений агроэкоценозах биоразнообразие микрофототрофов незначительно уступало заповедной территории (35 и 49 видов). Альгоиндикация по сообществам водорослей и цианобактерий выступает в качестве информативного и чувствительного экспресс-метода оценки состояния почв. Реакцией на изменение условий среды является изменение видового состава и численности микрофототрофов.

Ключевые слова: почвы, альгоцианофлора, микрофототрофы, антропогенная деятельность, цианобактерии, микроводоросли.

Soil algocyanoflora specificity under anthropogenic pressure

© 2025. L. V. Kondakova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-2190-686X¹,

N. V. Syrchina², ORCID: 0000-0001-8049-6760²,

I. A. Kondakova², ORCID: 0000-0001-9336-8709²

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: ecolab2@gmail.com

Algocyanoflora is an important component of soil microbiota. Anthropogenic pressure causes considerable transformation of natural microbiological communities. Thus there are certain negative consequences. We compare the microphototroph species content in soils differ in the character of the anthropogenic pressure: site 1 – nature reserve soils; site 2 – technogenic soils; site 3 – soils used in agricultural holdings, farms. As a result the richest microphototrophic species composition was in nature reserve soils. Soil management and heavy fertilizing with swine manure slurry decreased microphototrophic biodiversity by 30%. Technogenic pressure decreased biodiversity almost by 50%. *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*,

Chlorella vulgaris, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), and *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta) are the most tolerant to anthropogenic pressure. Ochrophyte microalgae species are the least tolerant to anthropogenic pressure, while green algae are most tolerant ones. Technogenic factor greatly affects the soil microphototrophic communities. At the technogenically stressed site microphototroph species diversity is almost two times lower compared to the control site (nature reserve). The microphototroph biodiversity in nutrient-rich agrozems is just a bit less than in nature reserve (35 and 49 species, respectively). Algorindication according to algae and cyanobacteria communities is an informative and sensitive quick-test in assessing the soil status. Changes in the species composition and abundance of microphototrophs are a response to changes in environmental conditions.

Keywords: soils, algocyanoflora, microphototrophs, anthropogenic activity, cyanobacteria, microalgae.

Почвенная альгоцианофлора представляет собой весьма разнообразную группу микроорганизмов (МО), включающую автотрофные прокариоты (цианобактерии) и эукариотические микроводоросли. Фототрофные МО играют исключительно важную роль в почвообразовательных процессах: связывании атмосферного азота, круговороте веществ и биогенных элементов, создании благоприятных условий для жизнедеятельности растений и почвенных животных. Согласно имеющимся оценкам, эффективность фиксации CO₂ микроводорослями примерно в 10–50 раз выше, чем высшими растениями [1, 2], благодаря чему они вносят значительный вклад в поддержание баланса CO₂ в атмосфере [3, 4]. Обитающие в почве цианобактерии (ЦБ) способны устанавливать симбиотические ассоциации с растениями, грибами, бактериями, оказывать стимулирующее влияние на рост высших растений, метаболизировать широкий спектр загрязняющих веществ, включая пестициды и антибиотики [5–7]. Вместе с тем, многие представители ЦБ (токсигенные ЦБ) входят в число самых опасных организмов нашей планеты, поскольку синтезируют и выделяют в окружающую среду токсичные соединения – фикотоксины. Нарушение естественных механизмов сдерживания размножения ЦБ и водорослей вызывает негативные экологические последствия, например, «цветение» водоёмов. Фикотоксины могут накапливаться растениями и переноситься по пищевым цепям на другие трофические уровни, что представляет угрозу для человека и животных. В последние годы токсигенные ЦБ привлекают большое внимание исследователей в качестве биотехнологического инструмента получения натуральных биоцидов для защиты культурных растений, а также фармацевтических препаратов с выраженным противоопухолевым, антибактериальным, противовирусным, противогельминтным действием [8].

Снижение видового разнообразия почвенных микрофототрофов отражается на сло-

жившихся между разными группами МО консортивных связях, что приводит к трансформации естественных биогеохимических циклов, уменьшению запасов органического вещества, изменению баланса питательных элементов, накоплению экотоксичных соединений, утрате супрессивности [9].

Несмотря на высокий адаптационный потенциал и способность выживать в условиях экологического и эволюционного давления, микрофототрофы проявляют значительную чувствительность к наличию в почве питательных и загрязняющих веществ, при этом воздействие низких и высоких доз поллютантов на соответствующие МО может варьировать от стимуляции до полного ингибирования [10]. Выявленная реакция микрофототрофных сообществ на те или иные виды воздействий представляет определённый интерес для разработки методов биоиндикации экологического состояния территорий и объектов окружающей среды [11, 12]. В этом отношении особую научную и практическую значимость приобретают исследования, направленные на выявление связей и отношений между условиями обитания и спецификой формирующихся в соответствующих условиях сообществ водорослей и ЦБ, а также прогнозирование рисков негативной трансформации соответствующих сообществ в сторону сокращения полезных и глобального распространения вредных микрофототрофных организмов [13, 14].

Цель работы – изучить видовое разнообразие альго-цианобактериальных сообществ, сформированных на почвах с разным характером антропогенного воздействия.

Объекты и методы исследования

Для оценки различных видов антропогенного воздействия на состав почвенной альгоцианофлоры были выбраны три вида участков на территории Кировской области. Первый участок находится на территории разнотравно-злакового луга в заповеднике

«Нургуш» (участок 1). Второй участок расположен в зоне воздействия крупного промышленного предприятия области – в районе хвостохранилища мела завода по производству минеральных удобрений (участок 2), третий – в окрестностях свинокомплекса на пахотном поле, удобряемом навозными стоками (участок 3). Для обозначения почвы участка 1 в контексте настоящей работы используется термин «почва заповедника», участка 2 – «техногенная почва», участка 3 – «агрогенная почва».

Отбор проб для анализа проводился в соответствии с требованиями микробиологии. Видовой состав микрофототрофов определяли методом постановки водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [15]. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности. Названия идентифицированных видов в настоящей статье приведены в соответствии с международной номенклатурой (www.algaebase.org).

Результаты и обсуждение

В результате выполненных исследований в почвах различных участков было выявлено 69 видов водорослей и ЦБ, в том числе: *Cyanobacteria* – 21; *Chlorophyta* – 29; *Ochrophyta* – 12; *Bacillariophyta* – 7. Наибольшее видовое разнообразие было представлено зелёными водорослями и ЦБ. Данные о видовом составе сообществ микрофототрофов, сформировавшихся на изученных территориях, приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведён таксономический состав альгоцианофлоры почвы разных участков.

Полученные данные показали, что наиболее богатым видовым составом альгоцианофлоры отличались почвы заповедной территории. Интенсивное агрогенное воздействие (обработка почвы, внесение в избыточных количествах свиных навозных стоков) привело к снижению биоразнообразия водорослей и ЦБ на участке 3 (агрогенная почва) на 30% относительно почвы заповедной территории. В условиях техногенного воздействия (техногенная почва) биоразнообразие микрофототрофов снизилось почти на 50%.

К видам, выявленным только в почве заповедника, следует отнести *Cylindrospermum muscicola*, *Tolypothrix tenuis* (*Cyanobacteria*), *Borodinella polytetrax*, *Chlamydomonas conversa*, *Cylindrocystis crassa*, *C. brebissonii*, *Gongrosira debaryana*, *Protoderma viride*, *Penium*

borgeanum (*Chlorophyta*), *Characiopsis minutissima*, *Ch. saccata*, *Ellipsoidion oocystoides*, *Pleurochloris commutate*, *P. anomala*, *Vischeria helvetica*, *V. aculeate* (*Ochrophyta*).

Наименее устойчивыми к антропогенному давлению оказались охрофитовые водоросли. Для представителей этого отдела, например, *Characiopsis*, *Vischeria*, характерно образование симбиотических связей с ксилотрофными грибами, широко представленными в почвах естественных биотопов (лесных, луговых) [16]. Очевидно, бедные растительными остатками техногенные почвы являются неблагоприятной средой для существования ксилотрофных грибов и связанных с ними *Ochrophyta*. Для обнаруженного в агрогенной почве вида *Xanthonema exile* характерна способность образовывать толстостенные гипнобласты, что способствует выживанию в неблагоприятных климатических условиях [17]. В техногенно нарушенных почвах данный вид не был выявлен. Возможно, это обусловлено высокой чувствительностью *Xanthonema exile* к загрязнению среды тяжёлыми металлами [18], что характерно для промышленных зон.

Более высокое видовое разнообразие диатомовых водорослей наблюдали в удобряемых навозными стоками почвах (агрогенная почва). Сообщества *Bacillariophyta* положительно реагируют на наличие в почве органического вещества, а также неорганических и органических соединений фосфора [19]. Фосфор является критически важным элементом для роста диатомовых водорослей. Благоприятное для диатомовых водорослей содержание биодоступного фосфора и органики обеспечено за счёт внесения в почву участка 3 высоких доз свиных навозных стоков. Использование в качестве удобрений навозных стоков также способствует повышению влажности почвы, что очень важно для чувствительных к этому фактору диатомей. Виды *Luticola mutica* и *Hantzschia amphioxys* менее чувствительны к наличию влаги и могут выдерживать длительные периоды высыхания [20]. Присутствующая на всех изученных территориях *Hantzschia amphioxys* проявляет высокую устойчивость к токсичным соединениям, включая гербициды [21], что обуславливает её конкурентные преимущества в окружающей среде. Результаты исследований дают основание предположить, что внесение в почву навозных стоков обеспечивает благоприятную экологическую нишу для активного развития *Bacillariophyta*. Считается, что эти МО являются хорошими продуцентами ор-

Таблица 1 / Table 1

Состав сообществ микрофототрофов в почвах различных участков
Species composition of microphototrophic communities in soils of different ecotopes

Таксоны, виды / Taxons, species		Участки / Sites		
		1	2	3
Cyanobacteria				
1	<i>Cylindrospermum muscicola</i> Kütz.	+	-	-
2	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> (Bory) Kütz.	+	-	+
3	<i>Cylindrospermum michailovskoëense</i> Elenk.	-	-	+
4	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+
5	<i>Leptolyngbya boryana</i> (Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	+
6	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	+
7	<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	-
8	<i>Nostoc linckia</i> (Roth) Born. et Flah. f. <i>muscorum</i> (Ag.) Elenk.	+	-	+
9	<i>Nostoc paludosum</i> Kütz.	+	-	+
10	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kütz.) Elenk.	+	+	+
11	<i>Phormidium aerugineo-caeruleum</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	+
12	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	-	+
13	<i>Phormidium breve</i> (Kütz. ex Gom.) Anagn. et Kom.	+	-	-
14	<i>Phormidium boryanum</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+
15	<i>Phormidium henningsii</i> Lemm.	+	+	-
16	<i>Phormidium formosum</i> (Bory ex Gomont) Anagn. et Kom.	-	+	-
17	<i>Phormidium jadinianum</i> Gom.	+	+	-
18	<i>Phormidium molle</i> (Kütz.) Gom.	+	+	-
19	<i>Phormidium uncinatum</i> (Ag.) Gom.	+	-	+
20	<i>Pseudanabaena catenata</i> Laut.	-	-	+
21	<i>Tolypothrix tenuis</i> Kütz. ex Born. et Flah.	+	-	-
Всего Cyanobacteria / The total of Cyanobacteria		15	9	13
Chlorophyta				
1	<i>Actinochloris sphaerica</i> Korsch.	+	-	+
2	<i>Borodinella polytetras</i> Mill.	+	-	-
3	<i>Bracteacoccus minor</i> (Chodat) Petrova	+	-	+
4	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch. var. <i>gloeogama</i>	+	+	+
5	<i>Chlamydomonas gelaninosa</i> Korsch. in Pascher	+	+	-
6	<i>Chlamydomonas minutissima</i> Korsch. in Pascher	+	+	+
7	<i>Chlamydomonas oblongella</i> Lund	+	+	-
8	<i>Chlamydomonas conversa</i> Korsch.	+	-	-
9	<i>Chlorococcum dissectum</i> Korsch.	-	-	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+
11	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. var. <i>vulgaris</i>	+	+	+
12	<i>Chloroplana terricola</i> Hollerb.	+	+	+
13	<i>Chlorosarcinopsis minor</i> (Gerneck) Herndon	-	+	-
14	<i>Cylindrocystis crassa</i> De Bary	+	-	-
15	<i>Cylindrocystis brebissonii</i> Menegh. var. <i>brebissonii</i>	+	-	-
16	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.	+	-	-
17	<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+	+
18	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lokh.	+	+	+
19	<i>Klebsormidium dissectum</i> (F.Gay) H.Ettl et G.Gärtner	-	+	-
20	<i>Klebsormidium rivulare</i> (Kütz.) M.O.Morison et Sheath	-	+	-
21	<i>Palmella miniata</i> Leibl	-	-	+
22	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	+	-
23	<i>Protoderma viride</i> Kütz.	+	-	-
24	<i>Follicularia paradoxalis</i> Mill.	-	-	+

Таксоны, виды / Taxons, species		Участки / Sites		
		1	2	3
25	<i>Penium borgeanum</i> Skuja	+	–	–
26	<i>Scotiellopsis levicostata</i> (Hollerb.) Puncocharova et Kalina	+	+	–
27	<i>Stichococcus bacillaris</i> Näg.	–	+	–
28	<i>Stichococcus minor</i> Näg.	–	+	–
29	<i>Tetracystis aggregata</i> R.M. Brown et H.C. Bold	–	+	+
Всего Chlorophyta / The total of Chlorophyta		20	17	13
Ochrophyta				
1	<i>Characiopsis minutissima</i> Pasch.	+	–	–
2	<i>Characiopsis saccata</i> Carter	+	–	–
3	<i>Ellipsoidion oocystoides</i> Pasch.	+	–	–
4	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	+	–	+
5	<i>Pleurochloris commutata</i> Pasch.	+	–	–
6	<i>Pleurochloris anomala</i> James	+	–	–
7	<i>Bumilleria klebsiana</i> Pasch.	–	+	+
8	<i>Vischeria magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	+	–	+
9	<i>Vischeria helvetica</i> (Visch. et Pasch.) Hibberd	+	–	–
10	<i>Vischeria irregularis</i> Pasch.	+	–	–
11	<i>Vischeria aculeata</i> Pasch.	+	–	–
12	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs.) Silva	–	–	+
Всего Ochrophyta / The total of Ochrophyta		10	1	4
Bacillariophyta				
1	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+
2	<i>Luticola cohnii</i> (Hilse) Mann in Round et al.	–	–	+
3	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	–
4	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	–	+
5	<i>Nitzschia palea</i> (Kütz.) W. Smith	–	–	+
6	<i>Pinnularia borealis</i> Ehr.	+	–	+
7	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	–	–	+
Всего Bacillariophyta / The total of Bacillariophyta		4	2	6
Итого / Total		49	26	35

Примечание: «+» означает, что вид обнаружен, «–» – вид не обнаружен. Здесь и в таблицах 2, 3: участок 1 – почвы заповедника, участок 2 – почвы техногенной территории, участок 3 – почвы сельскохозяйственных предприятий.

Note: “+” – the species is detected, “–” – the species is not detected. Here and in Table 2, 3: site 1 – nature reserve soils, site 2 – technogenic soils, site 3 – soils used in agricultural holdings, farms.

Таблица 2 / Table 2

Таксономическая структура альгоцианофлоры почв различных участков
Taxonomic composition of soil algocyanoflora in different sites

Отдел / Division	Таксономический состав альгоцианофлоры / Taxonomic composition of algocyanoflora						Всего видов Total number of species
	Участок 1 Site 1		Участок 2 Site 2		Участок 3 Site 3		
	A	B	A	B	A	B	
Цианобактерия	15	30,6	6	23,1	13	37,2	21
Chlorophyta	20	40,8	17	65,4	12	34,3	29
Ochrophyta	10	20,4	1	3,8	4	11,4	12
Bacillariophyta	4	8,2	2	7,7	6	17,1	7
Всего по участкам Total for sites	49	100	26	100	35	100	–

Примечание: A – число видов; B – доля от общего числа видов соответствующего таксона, %; «–» – нет данных.
Note: A – number of species; B – proportion of the total number of species of the corresponding taxon, %; “–” – no data.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты Жаккара флористического сходства сравниваемых участков
Jaccard Similarity Coefficient of the compared sites flora

Участок / Site	1	2	3
1		31,6	33,3
2			29,8
3			

ганического вещества и играют важную роль в формировании и стабилизации почвенных агрегатов [22].

На сообщества почвенных ЦБ наиболее существенное влияние оказал техногенный фактор. В техногенно нарушенных почвах (участок 2) разнообразие ЦБ существенно уменьшилось (на 60% относительно почв заповедника). Данный факт свидетельствует о развитии глубоких деградиционных процессов. В относительно богатых питательными веществами агрозёмах биоразнообразие ЦБ лишь незначительно уступало разнообразию ЦБ в почвах заповедника.

Цианобактерии *Leptolyngbya boryana* и *Phormidium boryanum* были выявлены только в антропогенно нарушенных почвах. Нитчатая ЦБ *Leptolyngbya boryana* широко распространена в водных и наземных экосистемах разных экотопов. Замечательной особенностью данного МО является повышенная устойчивость к воздействию соединений мышьяка (As). Возможно, данная особенность обеспечивает конкурентные преимущества *L. boryana* в техногенных почвах [23]. *Phormidium boryanum* хорошо приспособлена к существованию в загрязнённых средах и средах с повышенным содержанием солей, что также повышает её устойчивость в условиях антропогенной нагрузки [24, 25].

Сообщества Chlorophyta отличались относительно высоким разнообразием на всех изученных территориях, однако на агрогенной почве видовое разнообразие соответствующих МО было на 35% ниже, чем в почве заповедника, что крайне нежелательно для поддержания плодородия и супрессивности агрозёмов. Известно, что Chlorophyta играют важную роль в борьбе с деградацией нарушенных земель. Обеспечение условий для поддержания их численности, разнообразия и баланса с другими МО в почвах имеет большое природоохранное значение. В настоящее время проводится значительное количество исследований, посвящённых использованию некоторых видов Chlorophyta в качестве зелёных удобрений [26, 27].

Определённый интерес представляет изменение соотношения Chlorophyta и

Суанобактерия в техногенной и агрогенной почвах. В техногенной почве наблюдается значительное снижение количества видов ЦБ, в агрогенной – зелёных водорослей (относительно почвы заповедника). Вероятной причиной соответствующего явления может выступать баланс биодоступного фосфора и связанного азота [28]. Для удобряемых навозными стоками почв (агрогенная почва) характерно очень высокое содержание подвижного фосфора (700 и более мг/кг) на фоне относительно низкого содержания азота [29, 30]. Соответствующие условия значительно повышают конкурентные преимущества азотфиксирующих ЦБ. В условиях техногенного давления в бедных биодоступными фосфатами почвах (участок 2) ЦБ утрачивают соответствующие преимущества и их видовое разнообразие сокращается.

Как в техногенно, так и в агрогенно нарушенных почвах были обнаружены виды, не отмеченные в почве заповедника. Так, на участке 2 выявлены: *Leptolyngbya fragilis*, *Phormidium formosum* (Cyanobacteria), *Chlorosarcinopsis minor*, *Klebsormidium dissectum*, *Klebsormidium rivulare* (Chlorophyta); на участке 3 – *Cylindrospermum michailovskoense*, *Pseudanabaena catenata* (Cyanobacteria), *Palmella miniata*, *Follicularia paradoxalis* (Chlorophyta), *Xanthonema txile* (Ochrophyta), *Luticola cohnii*, *Nitzschia palea*, *Pinnularia intermedia* (Bacillariophyta). Опубликовано очень мало работ, посвящённых особенностям метаболизма и экологической роли соответствующих МО. Однако, в ряде исследований отмечается, что *Phormidium formosum* относится к продуцентам фикотоксина [31], *Leptolyngbya fragilis* способна метаболизировать нефтяные углеводороды и может быть использована в качестве идеального кандидата для биоремедиации загрязнённых углеводородами участков [32], *Pseudanabaena catenata* была идентифицирована как доминирующий фотосинтетический организм во время «цветения» в радиоактивном пруду с отработанным ядерным топливом [33].

В таблице 3 приведены коэффициенты флористического сходства сравниваемых участков почв.

Коэффициенты Жаккара указывают на слабое флористическое сходство сравниваемых участков. Антропогенная нагрузка приводит к уменьшению общего видового разнообразия микрофототрофов. Слабое сходство альгоцианофлоры обеспечивают толерантные виды, выявленные на всех участках: *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (ЦБ), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta).

Заключение

Интенсивная хозяйственная деятельность оказывает существенное влияние на видовой состав почвенной альгоцианофлоры. В антропогенно нарушенных почвах наблюдается снижение видового разнообразия как ЦБ, так и водорослей относительно участка на территории заповедника. Снижение биоразнообразия микрофототрофов в агрогенных и техногенных почвах свидетельствует о развитии деградиционных процессов. Особую опасность представляет дегградация земель сельскохозяйственного назначения, поскольку нарушенные почвы утрачивают супрессивность, способность к самоочищению, нормальному протеканию геохимических процессов и поддержанию баланса питательных элементов.

Наиболее толерантными к антропогенной нагрузке оказались такие виды микрофототрофов как *Leptolyngbya angustissima*, *Nostoc punctiforme* (Cyanobacteria), *Chlamydomonas gloeogama*, *Ch. minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, *Chloroplana terricola*, *Klebsormidium flaccidum*, *Kl. nitens* (Chlorophyta), *Hantzschia amphioxys* (Bacillariophyta).

Альгоиндикация почв по сообществам водорослей и цианобактерий выступает в качестве информативного и чувствительного экспресс-метода оценки экологического состояния почв. Реакцией на изменение условий среды является изменение видового состава альгоцианофлоры.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Subashchandrabose S.R., Ramakrishnan B., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Mixotrophic cyanobacteria and microalgae as distinctive biological agents for organic pollutant degradation // Environ. Int. 2013. V. 51. P. 59–72. doi: 10.1016/j.envint.2012.10.007
2. Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. CO₂ bio-mitigation using microalgae // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2008. V. 79. P. 707–718. doi: 10.1007/s00253-008-1518-y
3. Prasad R., Gupta S.K., Shabnam N., Oliveira C.Y.B., Nema A.K., Ansari F.A., Bux F. Role of microalgae in global CO₂ sequestration: Physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective // Sustainability. 2021. V. 13. No. 23. Article No. 13061. doi: 10.3390/su132313061
4. Singh U.B., Ahluwalia A.S. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration // Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. 2013. V. 18. No. 1. P. 73–95. doi: 10.1007/s11027-012-9393-3
5. Hooda S., Malik G., Saini P., Grewal A., Pandey V.C. Cyanobacteria as a potential bioasset for restoring degraded land // Land Degrad. Dev. 2023. V. 34. No. 12. P. 3435–3450. doi: 10.1002/ldr.4711
6. Yeheyo H.A., Ealias A.M., George G., Jagannathan U. Bioremediation potential of microalgae for sustainable soil treatment in India: A comprehensive review on heavy metal and pesticide contaminant removal // J. Environ. Manage. 2024. V. 363. Article No. 121409. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121409
7. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Kondakova I.A. The ground sulphur effect on algocyanoflora of alkaline soil // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 1. P. 131–140 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-131-140
8. Gärtner G., Stoyneva-Gärtner M., Uzunov B. Algal toxic compounds and their aeroterrestrial, airborne and other extremophilic producers with attention to soil and plant contamination: A review // Toxins. 2021. V. 13. No. 5. Article No. 322. doi: 10.3390/toxins13050322
9. Fang H., Zhai Y., Li C. Evaluating the impact of soil erosion on soil quality in an agricultural land, north-eastern China // Sci. Rep. 2024. V. 14. No. 1. Article No. 15629. doi: 10.1038/s41598-024-65646-5
10. Ramakrishnan B., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R., Sethunathan N. The impacts of environmental pollutants on microalgae and cyanobacteria // Crit. Rev. Env. Sci. Technol. 2010. V. 40. No. 8. P. 699–821. doi: 10.1080/10643380.802471068
11. Carvalhido V., Bessa da Silva M.B., Santos M., Tamagnini P., Melo P., Pereira R. Development of an ecotoxicological test procedure for soil microalgae // Sci. Total Environ. 2021. V. 783. Article No. 147006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147006
12. Chung M.K., Hu R., Wong M.H., Cheung K.C. Comparative toxicity of hydrophobic contaminants to

- microalgae and higher plants // *Ecotoxicology*. 2007. V. 16. No. 5. P. 393–402. doi: 10.1007/s10646-007-0134-4
13. Hu W., Su S., Mohamed H.F., Xiao J., Kang J., Krock B., Xie B., Luo Z., Chen B. Assessing the global distribution and risk of harmful microalgae: A focus on three toxic *Alexandrium* dinoflagellates // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 948. Article No. 174767. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174767
14. Spatharis S., Dolapsakis N.P., Economou-Amilli A., Tsirtsis G., Danielidis D.B. Dynamics of potentially harmful microalgae in a confined Mediterranean Gulf-Assessing the risk of bloom formation // *Harmful algae*. 2009. V. 8. No. 5. P. 736–743. doi: 10.1016/j.hal.2009.03.002
15. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. M.: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).
16. Mukhin V.A., Patova E.N., Sivkov M.D., Novakovskaya I.V., Neustroeva N.V. Diversity and nitrogen-fixing activity of phototrophic mycetobionts of xylotrophic fungi // *Russ. J. Ecol.* 2018. V. 49. No. 5. P. 406–412. doi: 10.1134/S1067413618050090
17. Gaisina L.A. Effects of extreme temperatures on *Xanthonema exile* (Klebs) Silva (Xanthophyta) // *Russ. J. Ecol.* 2006. V. 37. No. 3. P. 213–216. doi: 10.1134/S106741360603012X
18. Gaisina L.A., Khaibullina L.S. Influence of heavy metals on the morphology of the soil algae *Xanthonema exile* (Klebs) Silva // *Eurasian Soil Science*. 2007. V. 40. P. 313–317. doi: 10.1134/S1064229307030106
19. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kondakova I.A. Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 184–190 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-184-190
20. Zhang Y., Ouyang S., Nie L., Chen X. Soil diatom communities and their relation to environmental factors in three types of soil from four cities in central-west China // *Eur. J. Soil Biol.* 2020. V. 98. Article No. 103175. doi: 10.1016/j.ejsobi.2020.103175
21. Cassol A.P.V., Zanella R., Torgan L.C. Soil diatoms in rice fields: comparison between organic and conventional systems and alterations after herbicide application // *Acta Botanica Brasiliica*. 2024. V. 38. Article No. e20230145. doi: 10.1590/1677-941X-ABB-2023-0145
22. Heger T.J., Straub F., Mitchell E.A.D. Impact of farming practices on soil diatoms and testate amoebae: A pilot study in the DOK-trial at Therwil, Switzerland // *Eur. J. Soil Biol.* 2012. V. 49. P. 31–36. doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.08.007
23. Zhu F., Yang M., Luo Z.X., Yu R.L., Hu G.R., Yan Y. Bioaccumulation and biotransformation of arsenic in *Leptolyngbya boryana* // *Environ. Sci. Pollut.* 2020. V. 27. P. 29993–30000. doi: 10.1007/s11356-020-09294-y
24. Klemenčič A.K., Balabanič D. Fitobentos in kako-vost vode v mrtvicah reke Mure // *Natura Sloveniae*. 2010. V. 12. No. 2. P. 5–22. doi: 10.14720/ns.12.2.5-22
25. Kurt O., Ulcay S., Taşkın E., Öztürk M. Taxonomy and description of the three marine cyanophycean algae from the Mediterranean Sea // *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.* 2010. V. 10. No. 1. P. 33–37. doi: 10.4194/trjfas.2010.0105
26. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // *Biotechnol. Adv.* 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.00
27. Gonzalez-Gonzalez L.M., de-Bashan L.E. The potential of microalgae–bacteria consortia to restore degraded soils // *Biology*. 2023. V. 12. No. 5. Article No. 693. doi: 10.3390/biology12050693
28. Kim H.S., Hwang S.J., Shin J.K., An K.G., Yoon C.G. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir // *Hydrobiologia*. 2007. V. 581. No. 1. P. 255–267. doi: 10.1007/s10750-006-0501-9
29. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Pilip L.V., Kondakova I.A. Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 190–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197
30. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. The effect of enrichment tailings of phosphorites as fertilizers on soil algocyanobacterial communities // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 174–180 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-174-180
31. Baker P.D., Steffensen D.A., Humpage A.R., Nicholson B.C., Falconer I.R., Lanthois B., Fergusson K.M., Saint C.P. Preliminary evidence of toxicity associated with the benthic cyanobacterium *Phormidium* in South Australia // *Environ. Toxicol.* 2001. V. 16. No. 6. P. 506–511. doi: 10.1002/tox.10009
32. Ghanbarzadeh M., Niknam V., Soltani N., Ebrahimzadeh H. *Leptolyngbya fragilis* ISC 108 is the most effective strain for dodecane biodegradation in contaminated soils // *Int. J. Phytoremediation*. 2019. V. 21. No. 9. P. 908–920. doi: 10.1080/15226514.2019.1583635
33. Foster L., Muhamadali H., Boothman C., Siee D., Pittman J.K., Goodacre R., Morris K., Lloyd J.R. Radiation tolerance of *Pseudanabaena catenata*, a cyanobacterium relevant to the first generation magnox storage pond // *Front. Microbiol.* 2020. V. 11. Article No. 515. doi: 10.3389/fmicb.2020.00515

Изменчивость углеродного цикла агроэкосистем в условиях обработки агротёмно-серых почв живыми культурами цианобактерий и микроводорослей

© 2025. Н. П. Неведров¹, к. б. н., доцент,
Е. Д. Будаева¹, студент, В. А. Лукьянов², к. б. н., с. н. с.,
¹Курский государственный университет,
305000, Россия, г. Курск, ул. Радищева, д. 33,
²Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 70б,
e-mail: 9202635354@mail.ru

В последние десятилетия интенсивное сельскохозяйственное освоение земель привело к значительным потерям органического углерода почвами. В условиях Курской агломерации исследовалось влияние обработки агротёмно-серой почвы (Grey-Luvic Phaeozems Hortic) биопрепаратами на основе цианобактерии *Nostoc punctiforme* Hariot и микроводоросли *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss на почвенную эмиссию диоксида углерода под различными сельскохозяйственными культурами: соей (*Glycine max* (L.) Merr.), ячменём (*Hordeum vulgare* L.), овсом (*Avena sativa* L.), озимой рожью (*Secale cereale* L.). Выявлено, что обработка почвы исследуемыми культурами цианобактерий и микроводорослей изменяет интенсивность процессов углеродного цикла. В условиях лабораторных и полевых исследований было установлено, что обработка поверхности почвы живой культурой *C. sorokiniana* способствует увеличению численности основных групп почвенных микроорганизмов (бактерий – в 25,6 раза, грибов – в 37,9 раза и актиномицетов – в 57,3 раза), а также, в зависимости от возделываемой культуры, может приводить как к росту скорости почвенной эмиссии CO₂ от 6,0 до 41,8%, так и к уменьшению скорости потоков на 6,1–50,8%. При возделывании сои, овса и ржи в условиях агротёмно-серой почвы, обработанной культурой *C. sorokiniana*, удалось снизить общее количество эмитируемого в атмосферу органического углерода на 10,8%. Вне зависимости от обработки почв биопрепаратом на основе микроводорослей в исследуемый временной период наблюдались потери почвенного органического углерода в пахотном горизонте почвы, которые под разными возделываемыми культурами составили от 0,6 до 3,4 т/га.

Ключевые слова: эмиссия CO₂, *Chlorella sorokiniana*, *Nostoc punctiforme*, соя, овёс, рожь, ячмень, почвенный органический углерод, микробиологическая активность.

Variability of agroecosystem carbon cycle in Grey-Luvic Phaeozems Hortic treated with live cultures of cyanobacteria and microalgae

© 2025. N. P. Nevedrov¹ ORCID: 0000-0003-1121-0671
E. D. Budaeva¹ ORCID: 0009-0009-0863-8686
V. A. Lukyanov² ORCID: 0000-0003-1764-4083
¹Kursk State University,
33, Radishcheva St., Kursk, Russia, 305000,
²Kursk Federal Agrarian Research Center,
70b, Karla Marksa St., Kursk, Russia, 305021,
e-mail: 9202635354@mail.ru

Agroecosystem soils contribute significantly to the variability of carbon cycling in the biosphere. Intensive agricultural development has led to historic losses of organic carbon in soils in recent decades. According to FAO, greenhouse gas emissions in the agricultural sector have doubled over the past 50 years. In the coming decades CO₂ emissions are expected to increase by another 30%. We studied the effect of treating Gray-Luvic Phaeozems Hortic with biological products based on the cyanobacterium *Nostoc punctiforme* Hariot and microalgae *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss on soil CO₂ emissions under *Glycine max* (L.) Merr., *Hordeum vulgare* L., *Avena sativa* L., and *Secale cereale* L. in the Kursk agglomeration. We revealed that the above soil treatment changes the intensity of soil carbon cycling. In laboratory and field studies we found that soil surface treatment with *C. sorokiniana* live culture increases the main groups of soil microorganisms abundance (bacteria – 25.6 times, fungi – 37.9 times and actinomycetes – 57.3 times).

In addition, it can result in both an increase in soil CO₂ emission rate of 6.0 to 41.8%, and decrease of 6.1% to 50.8% depending on the cultivated crop. Cultivating *G. max*, *A. sativa*, and *S. cereale* in Gray-Luvic Phaeozems Hortic treated with *C. sorokiniana*, reduced the total amount of organic carbon emitted into the atmosphere by 10.8%. The application of a biological product based on *C. sorokiniana* in spring and summer decreased the CO₂ emission rate, while autumn treatment, on the contrary, promoted soil CO₂ emission. Regardless of soil treatment with microalgae-based biopreparation, losses of soil organic carbon were observed in the topsoil in the studied time period, which under different cultivated crops ranged from 0.6 to 3.4 t/ha.

Keywords: CO₂ emission, *Chlorella sorokiniana*, *Nostoc punctiforme*, *Glycine max*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, *Secale cereale*, soil organic carbon, microbiological activity.

Глобальные климатические изменения во многом обусловлены изменениями биогеохимического цикла углерода [1–4]. Вклад почвы в глобальный углеродный цикл состоит в формировании почвенного органического резерва, где углерод может находиться от десятков до сотен и тысяч лет [2]. При этом жизнедеятельность почвенной биоты, а также некоторые почвенные абиотические процессы, сопровождаются выделением парниковых газов [5].

Ежегодное увеличение концентрации CO₂ в атмосфере объясняется возрастающей антропогенной активностью, обусловленной культурным и техническим развитием человечества и ростом численности населения [6–8]. При этом весомый вклад в глобальную эмиссию вносит сельскохозяйственная деятельность человека, сопровождающаяся ежегодным увеличением пахотных земель [9, 10].

В России объёмы эмитированного почвой диоксида углерода за вегетационный сезон варьируют от 500 и менее CO₂ кг/га в арктической зоне до 6000 CO₂ кг/га для чернозёмов лесостепи [11]. В регионах с интенсивной сельскохозяйственной деятельностью потери углерода почвами составляют до 800 кг С/га в год [11].

Одним из способов сохранения и повышения плодородия почв, а также способов регулирования углеродного баланса в агроэкосистемах может являться внесение в почву живых культур микроводорослей и цианобактерий [12].

Цель исследования заключалась в экологической оценке влияния применяемых культур *Nostoc punctiforme* Hariot и *Chlorella sorokiniana* Shihira & R.W. Krauss на изменчивость почвенных потоков углерода в условиях агроэкосистем Курской области.

Объекты и методы исследования

В условиях лабораторных и полевых опытов (вегетационные сезоны 2022 и 2023 гг.) исследовались живые культуры *C. sorokiniana* и *N. punctiforme* на агротёмно-серых почвах

(PU (25 см) – AEL (31 см) – BEL (72 см) – Вt (104 см)) Агробиологической станции Курского государственного университета [13].

Для проведения лабораторного опыта использовали пластиковые контейнеры размером 20×15×6 см, в которые помещали агротёмно-серую почву (горизонт PU – органическое вещество – 3,4%, рН_{KCl} – 6,1, N/P/K 98/609/524 мг/кг) массой 1 кг, предварительно высушенную до воздушно-сухого состояния. Поверхность почвы дважды обрабатывали живыми культурами *N. punctiforme* и *C. sorokiniana* (43,9 мл/м²) путём опрыскивания в первый день эксперимента и перед посевом семян ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.). Содержание *C. sorokiniana* в рабочем растворе составляло 0,55 г/л, *N. punctiforme* – 0,60 г/л, в пересчёте на абсолютно сухой вес. В контрольном варианте обработку почвы проводили водой. Повторность опыта – трёхкратная.

Количественную оценку популяций микроводорослей проводили с помощью метода стёкол обрастания. На поверхность почвы укладывали покровные стёкла по 5 штук в каждую чашку Петри (во всех вариантах опыта и в каждой повторности), поддерживали влажность почвы около 50–60%. На пятый день экспозиции опыта проводили микроскопирование при увеличении ×400. Скорость эмиссии CO₂ измеряли с помощью инфракрасного газоанализатора (газоанализатор CO₂ AZ 7752, откалиброванный по Li-820) по методу закрытых камер [13] два раза: спустя 21 день после первой обработки биопрепаратами (до посева семян) и после вегетации культур ячменя и сои (спустя 19 суток после второй обработки почвы). Объём камеры составлял 1,56 л, площадь напочвенного основания (ограничивающего кольца) – 95 см², время экспозиции при замере – 3 мин. Во время замеров осуществляли контроль температуры и влажности почвы.

Влияние обработок почвы биопрепаратами на численность основных групп микроорганизмов (бактерии, грибы, актиномицеты)

оценивали методом посева из разведений почвенных суспензий на ГМФ-агар (агар на основе гидролизата говяжьего мяса ферментативного), агаризованные среды Чапека и Гаузе I.

Полевые исследования проводили с использованием мелкоделяночного опыта, размер делянок – 1×2 м, повторность по каждой культуре – пятикратная. Проведённые в вегетационные периоды 2022 и 2023 гг. опыты отличались приёмами внесения биопрепарата. Внесения корректировали намеренно, исходя из полученных результатов в первый вегетационный сезон. В вегетационный сезон 2022 г. исследование проводилось на трёх культурах: овёс (*Avena sativa* L.), озимая рожь (*Secale cereale* L.) и соя (*Glycine max* (L.) Merr.). Почву под посевами обрабатывали одинаковой дозой (4 л/га, при содержании в пересчёте на абсолютно сухую массу *C. sorokiniana* – 0,55 г/л) суспензии микроводоросли *C. sorokiniana* путём опрыскивания поверхности почвы. Контрольные делянки обрабатывали аналогичным объёмом воды. Обработку проводили один раз за сезон при установлении среднесуточной температуры воздуха не менее 15 °С в фазу развития плодов культур. Замеры скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы осуществляли ежемесячно.

В вегетационный сезон 2023 г. под культуры сои и ячменя вносили суспензию микроводоросли *C. sorokiniana* в дозе 4 л/га ежемесячно с июня по сентябрь (всего 4 обработки). Измерения почвенной эмиссии CO₂ проводили до обработки почв биопрепаратом и спустя 3–5 суток после.

Для проведения исследований в полевых условиях применяли камерный метод, использовали инфракрасный газоанализатор CO₂ SENSIRION 1-101625-10 (SCD30), откалиброванный по Li-820 и концентрации CO₂ в нижней тропосфере – 400 ppm. Объём камеры составлял 6,7 л, площадь напочвенного основания (ограничивающего кольца) – 314 см², время экспозиции при замере – 3 мин. Параллельно с замерами скорости почвенной эмиссии CO₂ измеряли температуру (термометр Checktemp HI98501) и влажность почвы (влагомер MC-7828 SOIL) [14]. Измерения проводили в пятикратной повторности.

Для изучения динамики накопления и сезонных потерь углерода исследуемыми почвами определяли содержание органического углерода по Тюрину (ГОСТ 26213-91) в каждом варианте полевого опыта 2023 г. Пробы из горизонта PU каждой делянки отбирали в мае и октябре.

Статистическая обработка и графический дизайн выполнены с использованием средств Microsoft Excel 2007. Корреляционный анализ (корреляция Пирсона) проводили по 40 и 120 измерениям исследуемых параметров для каждого варианта опыта. Данные по потокам представлены в виде «среднее значение ± доверительный интервал» за каждый день отбора с каждого участка.

Метеорологические условия вегетационного сезона (май–октябрь) 2022 и 2023 гг. заметно различались (рис. 1).

Количество осадков, выпавших с мая по октябрь 2022 г., было на 16% меньше, чем в 2023 г. Наиболее значительная разница была характерна для июля – 128,8 мм и сентября – 140,9 мм. Также в сентябре сумма выпавших осадков диаметрально противоположно отклонялась от нормы, превосходя её в 2022 г. в 2,4 раза и снижаясь в 2023 г. – в 57,3 раза. Наиболее обильные осадки наблюдали в июле 2023 г. – 196,5 мм. В целом, рассматриваемые вегетационные сезоны характеризовались контрастными погодными условиями, что позволяло установить изменчивость углеродного цикла в определённые временные периоды при разных климатических сценариях.

Результаты и обсуждение

Лабораторные опыты. Обработка почв биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* приводила к увеличению численности этой водоросли в 1,6 раза по сравнению с контрольным вариантом и в 1,47 раза по сравнению с вариантом, где почва была обработана *N. punctiforme* ($p \leq 0,05$).

Обработка *N. punctiforme* приводила к увеличению количества этой цианобактерии в 10,4 раза по сравнению с контролем и в 8,2 раза по сравнению почвой, обработанной *C. sorokiniana* ($p \leq 0,05$).

Обработка пара (варианта опыта без высева культур) суспензиями цианобактерий и микроводорослей приводила к достоверному ($p \leq 0,05$) увеличению эмиссии диоксида углерода в 1,28–1,75 раза по сравнению со значениями, полученными на почве без обработки (рис. 2).

В варианте с культурой сои обработка почвы такими биопрепаратами значимо снижала почвенную эмиссию CO₂ по сравнению с контролем: *C. sorokiniana* – в 1,8 раза, *N. punctiforme* – в 2,25 раза. В опытах с культурой ячменя внесение суспензии *C. sorokiniana* приводило к увеличению почвенной эмиссии

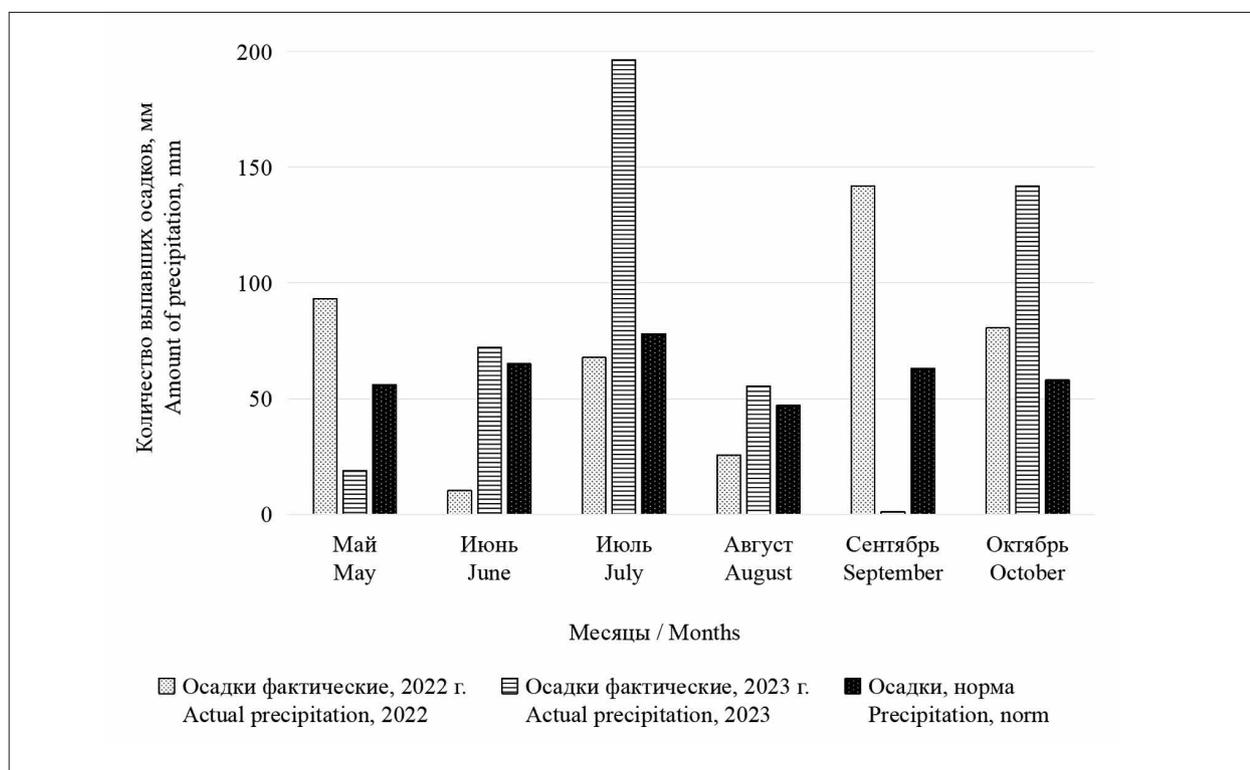


Рис. 1. Количество выпавших осадков за вегетационные периоды 2022 и 2023 гг. в городе Курске
 Fig. 1. The amount of monthly precipitation for 2022 and 2023 growing seasons in Kursk

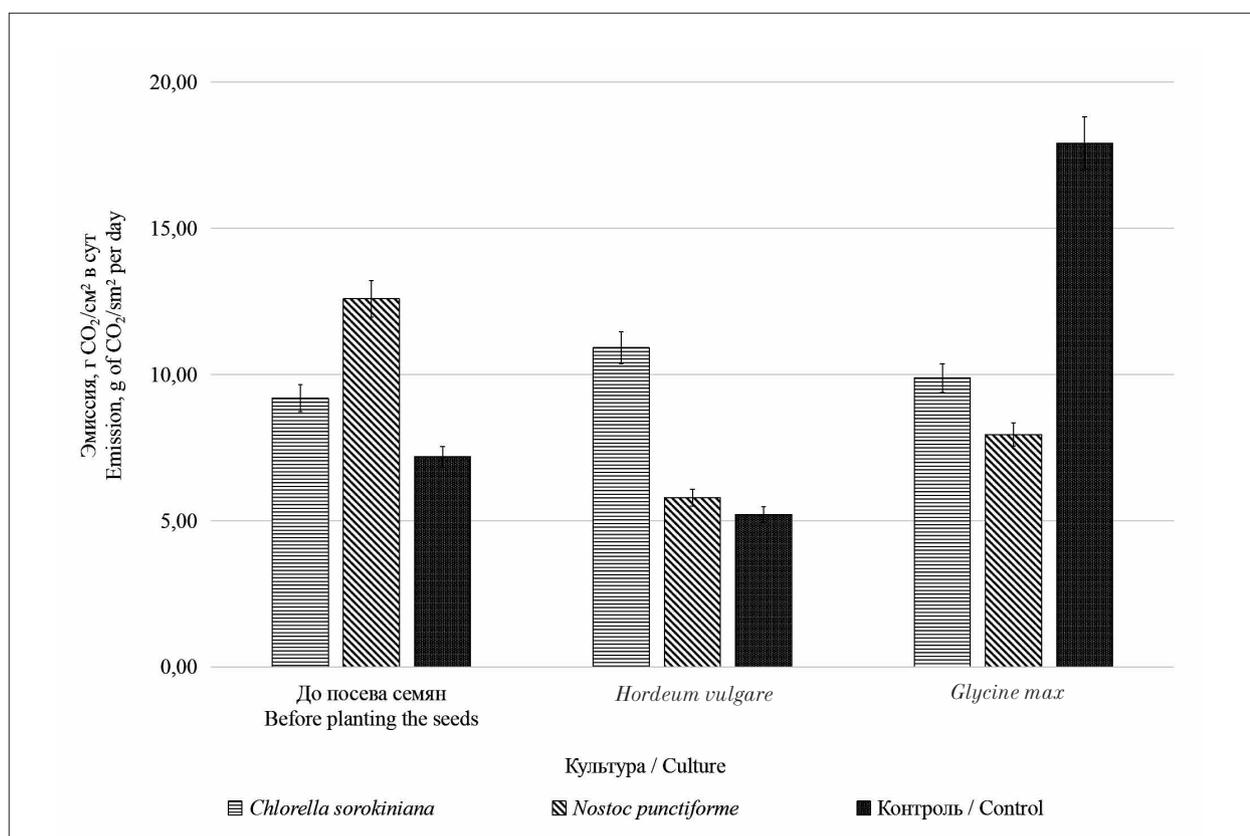


Рис. 2. Зависимость скорости эмиссии CO₂ с поверхности почв от обработки культурами цианобактерий и микроводорослей при возделывании сои и ячменя
 Fig. 2. Dependence of CO₂ emission rate from topsoil on treatment with *Nostoc punctiforme* and *Chlorella sorokiniana* under *Glycine max* and *Hordeum vulgare* cultivation

Таблица 2 / Table 2

Количество почвенных микроорганизмов при обработке почвы живыми культурами цианобактерий и микроводорослей / The number of soil microorganism major groups in soil treatment with *Nostoc punctiforme* and *Chlorella sorokiniana* live cultures

Биопрепарат Biopreparation	Количество почвенных микроорганизмов, КОЕ/г почвы Soil microorganism number, CFU/g of soil		
	Бактерии Bacteria	Грибы Fungus	Актиномицеты Actinomycetes
<i>C. sorokiniana</i>	$(29 \pm 5) \cdot 10^5$	$(16 \pm 7) \cdot 10^5$	$(39,6 \pm 0,8) \cdot 10^5$
<i>N. punctiforme</i>	$(62 \pm 14) \cdot 10^3$	$(69 \pm 14) \cdot 10^3$	$(59 \pm 4) \cdot 10^3$
Контроль / Control	$(11,5 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(4,1 \pm 1,1) \cdot 10^4$	$(6,9 \pm 0,9) \cdot 10^4$

CO₂ по сравнению с контролем в 2,1 раза и по сравнению с вариантом, обработанным суспензией *N. punctiforme*, в 1,9 раза. В свою очередь, обработка биопрепаратом на основе *N. punctiforme* не приводила к значительным изменениям почвенной эмиссии CO₂ по сравнению с контролем.

Также было проведено исследование влияния обработки биопрепаратами на численность почвенных микроорганизмов (табл. 2).

Внесение *C. sorokiniana* способствовало увеличению численности всех исследуемых групп: бактерий, грибов и актиномицетов – в 25,6, 37,9 и 57,3 раза относительно контрольного варианта без обработки почвы. Обработка почвы биопрепаратом на основе *N. punctiforme* снизила количество бактерий в 1,8 раза и актиномицетов в 1,2 раза, увеличила численность грибов в 1,7 раза относительно контрольного варианта.

Полевые опыты. В вегетационный период 2022 г. внесение суспензии микроводоросли *C. sorokiniana* под культуру овса снизило скорость почвенных потоков диоксида углерода в летние месяцы на 26,6–50,8% относительно значений контрольных делянок, однако в октябре и ноябре после уборки урожая значения скорости эмиссии CO₂ заметно повышались и превосходили таковые для необработанных почв в 3,3–3,8 раза соответственно (рис. 3).

Под культурой озимой ржи в июле в варианте опыта с обработкой почв биопрепаратом значения скорости эмиссии CO₂ были выше, чем в контрольном варианте. Однако в августе скорость потоков CO₂ с поверхности почвы на опытном участке снижалась в 1,3–1,5 раза относительно контрольного.

В осенние месяцы существенных различий в скорости эмиссии между контрольным вариантом и вариантом с обработанной *C. sorokiniana* почвой не наблюдалось (рис. 3).

Внесение живой культуры микроводоросли в почву под сою не приводило к изменениям скорости эмиссии CO₂ с поверхности почвы.

Почвенная эмиссия CO₂ коррелировала с температурой почвы ($r=0,65$, $t=11,93$ при $n=120$) и влажностью почвы ($r=-0,19$, $t_p=2,29$ при $n=120$).

В целом объём эмитируемого за период исследования CO₂ из обработанных *C. sorokiniana* почв был ниже, чем из необработанных под всеми исследуемыми культурами. Наибольшее количество CO₂, вне зависимости от обработки почв *C. sorokiniana*, эмитировали почвы в варианте опыта с культурой сои: в 1,2–1,4 раза больше, чем в варианте с культурой овса, и в 1,3 раза больше, чем в варианте с культурой озимой ржи.

Ежемесячное внесение живой культуры *C. sorokiniana* на поверхность агротёмно-серой почвы при выращивании сои, как правило, способствовало снижению скорости почвенной эмиссии CO₂ (рис. 4).

В отдельные месяцы скорость почвенных потоков CO₂ после внесения биопрепарата снижалась (на 4,0–18,8%) ($p \leq 0,05$) относительно значений этого показателя до внесения (рис. 4).

Внесение культуры *C. sorokiniana* в агротёмно-серую почву при возделывании сои позволило сократить количество эмитируемого почвой углерода на 10,8% (с 4,1 до 3,7 кг С/м²).

Под культурой ячменя значения скорости почвенных потоков CO₂ перед внесением суспензии *C. sorokiniana* значимо отличались: на опытных делянках значения эмиссии были ниже в 1,37 раза. Внесение биопрепарата на основе микроводоросли в первый месяц привело к увеличению значений почвенной эмиссии до уровня интенсивности потоков газа с поверхности почв контрольных делянок. Дальнейшее внесение микроводоросли поддерживало значения в течение июля на уровне 32–33 г CO₂/м² в сут. В сентябре на

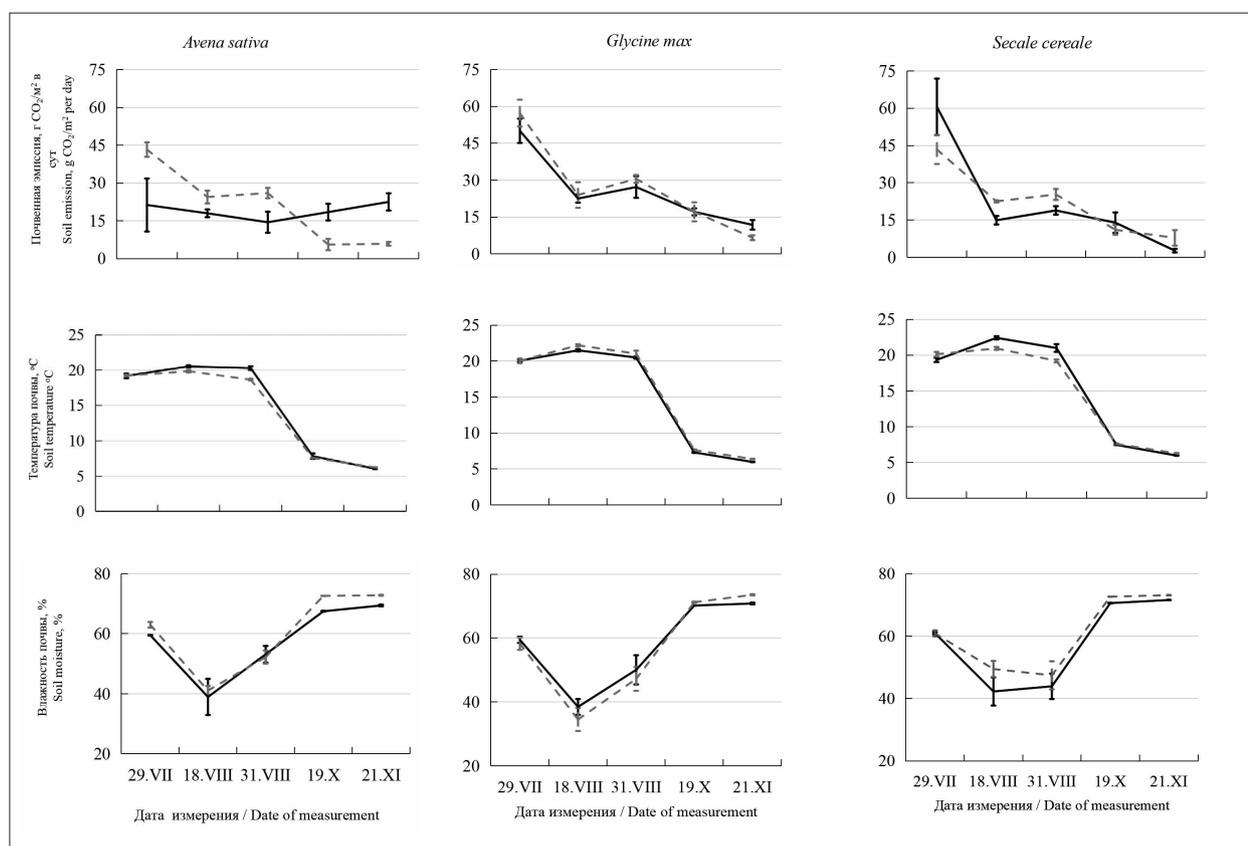


Рис. 3. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ и гидротермических условий при обработке агротёмно-серой почвы биопрепаратом *Chlorella sorokiniana* под разными культурами в 2022 г.: сплошная линия – с применением *C. sorokiniana*; пунктирная линия – контроль
Fig. 3. Grey-Luvic Phaeozems Hortic under different crops treated with *Chlorella sorokiniana* biopreparation (solid line) in 2022: seasonal dynamics of soil CO₂ emission and hydrothermal conditions; dotted line – control

обработанных почвах наблюдалось резкое увеличение скорости почвенной эмиссии, превышающее контроль в 1,4 раза. К ноябрю значения почвенной эмиссии на опытных и контрольных делянках упали до 13,4 и 12,4 г CO₂/м² в сутки соответственно и статистически не различались.

В ходе корреляционного анализа данных, полученных в 2023 г., снова удалось установить положительную корреляционную связь между показателем почвенной эмиссии CO₂ и температурой почвы ($r=0,40$, $t_p=3,18$ при $n=40$) и отрицательную корреляционную связь с влажностью почвы ($r=-0,57$, $t_p=5,35$ при $n=40$).

Содержание почвенного органического углерода в разрезе сезонной динамики снижалось во всех вариантах опыта с обработкой почвы (табл. 3).

Запасы углерода в пахотном горизонте исследуемых агротёмно-серых почв также уменьшались на 2,3–3,4 т/га в условиях обработки почв биопрепаратом. При отсутствии обработки весенние и осенние запасы почвен-

ного органического углерода существенно не различались.

Обработка почв живой культурой микроводоросли *C. sorokiniana* приводила к изменениям сезонной динамики скорости потоков CO₂ с поверхности агротёмно-серой почвы, что обусловлено одновременным внесением секвестратора CO₂ и дополнительного органического вещества, что также отмечалось в работе [15]. Направленность изменений показателя находилась в зависимости от возделываемой культуры и способа обработки почвы. При ежемесячной обработке почв под культурой сои биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* скорость почвенных потоков CO₂, как правило, снижалась на 6,1–24,7%, при общем за сезон уменьшении количества эмитируемого в атмосферу углерода на 10,8%. При однократной за вегетационный сезон обработке агротёмно-серых почв под соей внесение *C. sorokiniana* не вызвало существенных изменений в скорости потоков CO₂, что можно объяснить относительно низкой дозой на фоне изменяющихся погодных условий.

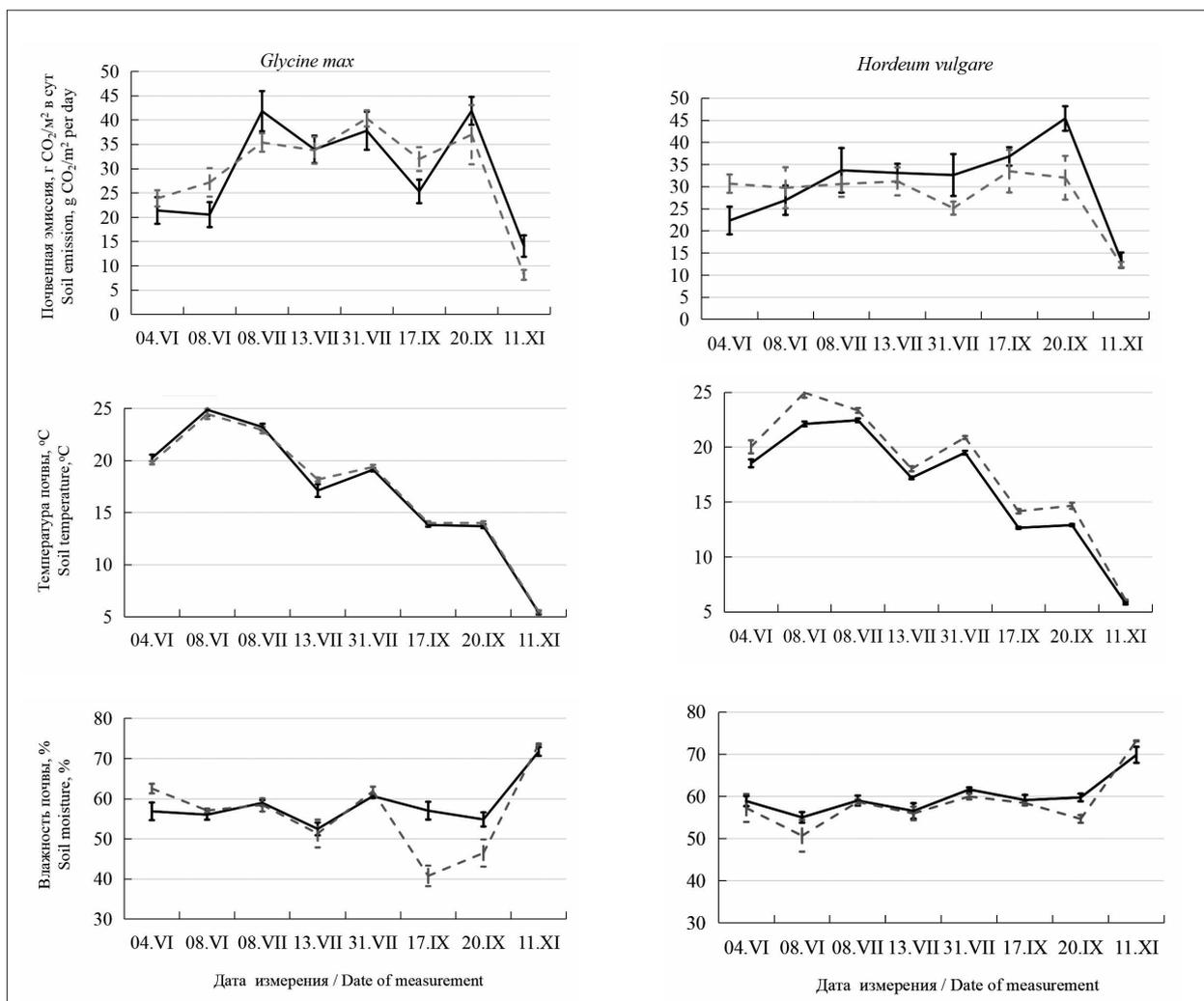


Рис. 4. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ при обработке агротёмно-серой почвы биопрепаратом *C. sorokiniana* под разными культурами в 2023 г.: сплошная линия – с применением *C. sorokiniana*; пунктирная линия – контроль
Fig. 4. Grey-Luvic Phaeozems Hortic under different crops treated with *C. sorokiniana* biopreparation (solid line) in 2023: seasonal dynamics of soil CO₂ emission and hydrothermal conditions; dotted line – control

Таблица 3 / Table 3
 Изменение содержания органического углерода в пахотном горизонте (20 см) в вегетационный сезон 2023 года / Changes in the topsoil (20 cm) organic carbon content during the 2023 growing season

Культура Crops	Содержание углерода, % / The gross organic carbon content, %			
	Почва, обработанная <i>C. sorokiniana</i> Soil treated with <i>C. sorokiniana</i>		Почва без обработки Soil without treatment	
	Май / May	Октябрь / October	Май / May	Октябрь / October
Соя <i>Glycine max</i>	2,49±0,09	2,32±0,03*	2,49±0,17	2,41±0,03
Ячмень <i>Hordeum vulgare</i>	2,49±0,03	2,38±0,03*	2,47±0,09	2,44±0,12

Примечание: *содержание почвенного органического углерода в мае и октябре достоверно различается при $p \leq 0,05$.
 Note: * soil organic carbon content in May and October differ significantly ($p \leq 0,05$).

Отмечалось разнонаправленное воздействие микроводоросли *C. sorokiniana* на показатель почвенной эмиссии CO₂ при её внесении в агротёмно-серые почвы под злаковые культуры. При обработке почв в варианте с ячменём скорость эмиссии CO₂ увеличивалась, под культурами овса и ржи, как правило, снижалась. Это можно объяснить как различиями в интенсивности корневого дыхания и составе микробиома [16], так и различиями в проективном покрытии исследуемых культур. По-видимому, именно поэтому эффективность биопрепарата преимущественно проявлялась в первой половине лета, когда площадь листовых пластинок ещё не достигла своего максимума.

Стоит отметить, что полученные результаты полевых и лабораторных испытаний по культурам сои и ячменя схожи по общей тенденции, направленной на увеличение скорости потоков под ячменём и снижением – под соей, что свидетельствует о перспективности применения биопрепаратов на основе микроводорослей в целях снижения углеродоёмкости процесса выращивания сои. Использование *C. sorokiniana* для снижения эмиссии CO₂ с поверхности агротёмно-серых почв под культурой сои целесообразно в ранние периоды вегетации, когда растения имеют низкое проективное покрытие.

Обработка почв биопрепаратом в конце вегетационного сезона после уборки урожая способствовала увеличению скорости почвенных потоков CO₂ относительно необработанных *C. sorokiniana* вариантов опыта, что также отмечалось в работе [15]. Это можно объяснить стимуляцией микробиологической активности почв в целом и активности ризосферной микробиоты в частности [15]. Полученные результаты позволили установить, что при внесении *C. sorokiniana* значительно увеличивалось количество почвенных бактерий, микромицетов и актиномицетов (до 57,3 раза), что, в свою очередь, приводило к интенсификации процессов биодеструкции пожнивных остатков и почвенного органического вещества. Стоит отметить, что повышение интенсивности биодеструкции пожнивных остатков в осеннее время может стимулировать гумификацию и способствовать запасанию органического углерода в почве [17].

Тем не менее, снижение скорости потоков CO₂ из исследуемых агротёмно-серых почв в течение рассматриваемого временного периода не приводило к накоплению органического углерода в пахотном горизонте (PU) ни в одном из вариантов опыта. Это обусловлено

особенностью баланса углерода в агроэкосистемах, где в связи с агротехнической обработкой почвы и выносом биомассы (основная сельскохозяйственная продукция) преимущественно имеют место потери органического углерода почвами [18, 19].

Выводы

Обработка агротёмно-серых почв культурой *C. sorokiniana* может приводить как к снижению скорости почвенных потоков CO₂ на 6,1–50,8% (под культурами сои, овса, озимой ржи), так и к увеличению на 6,0–23,3% (под культурой ячменя) по сравнению с необработанными почвами.

Обработка агротёмно-серых почв биопрепаратом *C. sorokiniana* способствовала увеличению численности бактерий, грибов и актиномицетов – в 25,6, 37,9 и 57,3 раза соответственно, что позволяет интенсифицировать процессы биодеструкции пожнивных остатков, стимулировать гумификацию и запастись органический углерод в почвах агроэкосистем. В свою очередь, обработка почв цианобактерией *N. punctiforme* приводила к уменьшению численности бактерий и актиномицетов в 1,8 и 1,2 раза соответственно, что может приводить к увеличению углеродоёмкости агротехнологий.

Для снижения углеродоёмкости процессов выращивания сои, озимой ржи и овса возможно проводить обработку почв биопрепаратом на основе *C. sorokiniana* в весеннее и летнее время, так как в осенний период отмечено ускорение почвенных потоков CO₂ (до 41,8% при выращивании сои и до 3,8 раза при выращивании овса).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «УМНИК» Фонда содействия инновациям, договор № 17460ГУ/2022.

Литература

1. Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14. № 5. С. 771–779.
2. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // Наука в России. 2012. № 5. С. 25–32.
3. Piao S., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // Nature. 2009. V. 458. No. 7241. P. 1009–1013. doi: 10.1038/nature07944

4. Baldocchi D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. No. 4. P. 479–492. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

5. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // *Aust. J. Bot.* 2008. V. 56. No. 5. P. 369–407. doi: 10.1071/BT07128

6. Aresta M., Dibenedetto A. The carbon dioxide revolution: Challenges and perspectives for a global society. Springer, Cham, 2021. 262 p. doi: 10.1007/978-3-030-59061-1

7. Буквич Р.М., Петрович Д.Р. Парниковый эффект и рыночные механизмы Киотского протокола // *Вестник НГИЭИ.* 2017. № 1 (68). С. 139–158.

8. Hofmann D.J., Butler J.H., Tans P.P. A new look at atmospheric carbon dioxide // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. No. 12. P. 2084–2086. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028

9. Bennetzen E.H., Smith P., Porter J.R. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions – The major trends over 40 years // *Global Environ. Change.* 2016. V. 37. P. 43–55. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.12.004

10. Lal R., Negassa W., Lorenz K. Carbon sequestration in soil // *Curr. Opin. Environ. Sustainability.* 2015. V. 15. P. 79–86. doi: 10.1016/j.cosust.2015.09.002

11. Национальный атлас почв Российской Федерации / Под общ. ред. С.А. Шобы. М.: Астрель, 2011. 632 с.

12. Лукьянов В.А., Стифеев А.И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. Курск: Изд-во КГСХА, 2014. 182 с.

13. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Seasonal dynamics of CO₂ emission from soils of Kursk // *Eurasian Soil Sc.* 2021. V. 54. P. 80–88. doi: 10.1134/S1064229321010117

14. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Spatial and temporal dynamics of carbon dioxide emission from Al-Fe-humus sandy soils in the forest-steppe zone // *Eurasian Soil Sc.* 2022. V. 55. P. 1546–1555. doi: 10.1134/S1064229322110096

15. Кублановская А.А., Хапчаева С.А., Зотов В.С., Зайцев П.А., Лобакова Е.С., Соловченко А.Е. Влияние суспензии клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* IPPAS C-1 (*Chlorophyceae*) на биологическую активность и микробиом почвы при возделывании фасоли // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология.* 2019. Т. 74. № 4. С. 284–293.

16. Гажеева Т.П., Гордеева Т.Х., Масленникова С.Н. Динамика численности и состава микроорганизмов ризосферы некоторых злаковых растений в процессе их роста и развития // *Вестник ОГУ.* 2011. № 12 (131). С. 328–330.

17. Петров В.Б., Чеботарь В.К. Управление деструкцией и гумификацией пожнивных остатков зерновых культур с использованием микробиологического пре-

парата Экстрасол // *Сельскохозяйственная биология.* 2012. Т. 47. № 3. С. 103–108.

18. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современной земледелии России // *Агрохимия.* 2019. № 12. С. 3–15. doi: 10.1134/S000218811912007X

19. Самбуу А.Д., Дапылдай А.Б., Куулар А.Н. Пул углерода в травяных экосистемах и агроценозах Тувы // *Вестник КрасГАУ.* 2009. № 12. С. 50–56.

References

1. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Carbon balance in peat bog ecosystems of Western Siberia // *Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal.* 2007. V. 14. No. 5. P. 771–779 (in Russian).

2. Kurganova I.N., Kudayarov V.N. Ecosystems of Russia and the global carbon budget // *Nauka v Rossii.* 2012. No. 5. P. 25–32 (in Russian).

3. Piao S., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // *Nature.* 2009. V. 458. No. 7241. P. 1009–1013. doi: 10.1038/nature07944

4. Baldocchi D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. No. 4. P. 479–492. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x

5. Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // *Aust. J. Bot.* 2008. V. 56. No. 5. P. 369–407. doi: 10.1071/BT07128

6. Aresta M., Dibenedetto A. The carbon dioxide revolution: Challenges and perspectives for a global society. Springer, Cham, 2021. 262 p. doi: 10.1007/978-3-030-59061-1

7. Bukvić R.M., Petrović D.R. Greenhouse effect and mechanisms of Kyoto Protocol // *Vestnik NGIEI.* 2017. No. 1 (68). P. 139–158 (in Russian).

8. Hofmann D.J., Butler J.H., Tans P.P. A new look at atmospheric carbon dioxide // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. No. 12. P. 2084–2086. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028

9. Bennetzen E.H., Smith P., Porter J.R. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions – The major trends over 40 years // *Global Environ. Change.* 2016. V. 37. P. 43–55. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.12.004

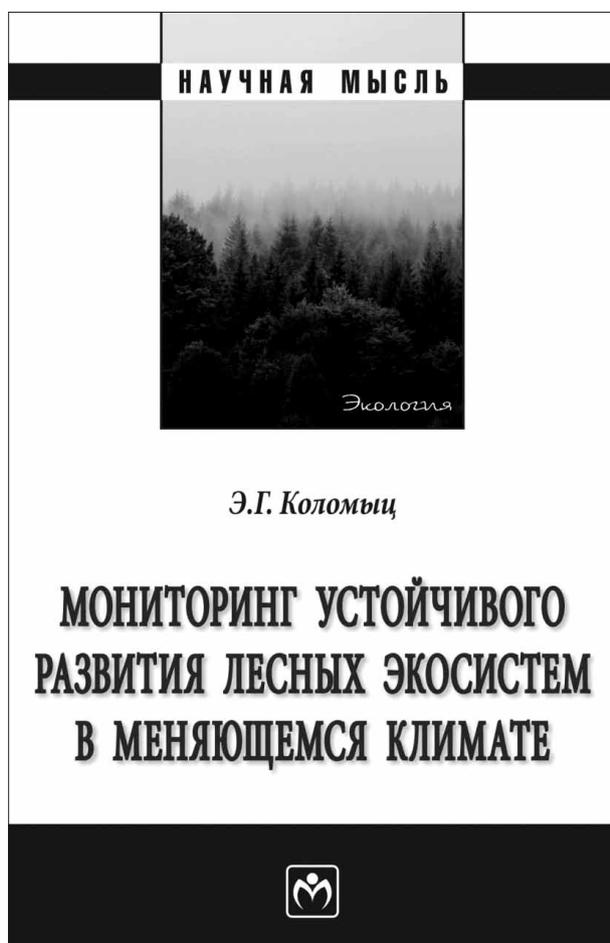
10. Lal R., Negassa W., Lorenz K. Carbon sequestration in soil // *Current Opin. Environ. Sustainability.* 2015. V. 15. P. 79–86. doi: 10.1016/j.cosust.2015.09.002

11. National soil atlas of the Russian Federation / Ed. S.A. Shoba. Moskva: Astrel, 2011. 632 p. (in Russian).

12. Lukyanov V.A., Stifeev A.I. Applied aspects of the use of microalgae in agroecosystem. Kursk: Izdatelstvo Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii, 2014. 182 p. (in Russian).

13. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Seasonal dynamics of CO₂ emission from soils of Kursk // *Eurasian Soil Sc.* 2021. V. 54. P. 80–88. doi: 10.1134/S1064229321010117
14. Nevedrov N.P., Sarzhanov D.A., Protsenko E.P., Vasenev I.I. Spatial and temporal dynamics of carbon dioxide emission from Al-Fe-humus sandy soils in the forest-steppe zone // *Eurasian Soil Sc.* 2022. V. 55. P. 1546–1555. doi: 10.1134/S1064229322110096
15. Kublanovskaya A.A., Khapchaeva S.A., Zotov V.S., Zaytsev P.A., Lobakova E.S., Solovchenko A.E. The effect of the microalgae *Chlorella vulgaris* IPPAS C-1 (Chlorophyceae) biomass application on yield, biological activity, and the microbiome of the soil during bean grown // *Herald of Moscow University. Series 16. Biology.* 2019. V. 74. No. 4. P. 284–293 (in Russian).
16. Gazheeva T.P., Gordeeva T.Kh., Maslennikova S.N. The dynamics of the size and composition microorganisms in the rhizosphere of some cereals during their growth and development // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2011. No. 12 (131). P. 328–330 (in Russian).
17. Petrov V.B., Chebotar' V.K. Management of destruction and humification of the post-harvest rests of cereal crops using microbiological preparation Extrasol // *Agricultural Biology.* 2012. No. 3. P. 103–108 (in Russian).
18. Kudeyarov V.N. The agrobiogeochemical cycles of carbon and nitrogen of Russian croplands // *Agrochemistry.* 2019. No. 12. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.1134/S000218811912007X
19. Sambuu A.D., Dapylday A.B., Kuular A.N. Carbon pool in the herbal ecosystems and agrocenoses of Tuva // *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2009. No. 12. P. 50–56 (in Russian).

Рецензия на монографию Э. Г. Коломыца
«Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем
в меняющемся климате / под ред. Б. И. Кочурова»
(М.: ИНФРА-М, 2024. 540 с. Серия: Научная мысль)
Review of the monograph by E.G. Kolomyts
“Monitoring of sustainable development of forest ecosystems
in a changing climate / ed. by B.I. Kochurov”
(Moskva: INFRA-M, 2024. 540 p. Series: Nauchnaya Mysl)



Эрланд Георгиевич Коломыц с 1990 г. до середины 2022 г. работал в Институте экологии Волжского бассейна РАН. Среди географов фигура Э.Г. Коломыца признанная и заметная: он автор более 25 объёмных монографий по гляциологии и географической экологии на русском и английском языках. В 2015 г. он стал лауреатом премии РАН им. академика А.А. Григорьева – одной из высших академических наград, присуждаемых географам. Его работы тщательно продуманы, опираются на обширный фактологический материал (хотя написаны зачастую многословно и сложны в восприятии),

его творчеству свойственны нестандартность мышления и оригинальность подхода к решению актуальных эколого-географических (географо-экологических) проблем. Считаю, что это неплохие качества для учёного-лидера в данном направлении исследований.

Прежде всего, в качестве положительно-го момента отмечу очень простую и строгую структуру книги, которая состоит из введения, четырёх частей (13 глав) и заключения. Во «Введении», опираясь на работы академика И.П. Герасимова (1975, с. 13), объектом общего мониторинга принимается «многокомпонентная совокупность природных явлений, подверженная многообразным естественным динамическим изменениям и испытывающая разнообразные воздействия и преобразования её человеком» и далее, «вся система контроля над окружающей средой включает три основных типа деятельности: систематические наблюдения над состоянием окружающей среды, определение возможных изменений (особенно под воздействием человека), контроль таких изменений и мероприятия по регулированию (управлению) окружающей среды».

Первая часть «Рабочие положения концепции геосистемного мониторинга лесов» (глава 1 «Пути разработки теории и методов геоэкологического мониторинга»; глава 2 «Ландшафтно-экологическая стратегия наземного геосистемного мониторинга лесов»), – можно сказать, теоретическая и посвящена обоснованию проблем глобальных изменений лесных экосистем на региональном и локальном уровнях. Глобальные изменения климата в различных регионах отражаются по-разному, что и определяет региональное многообразие биосферы. В качестве наиболее благоприятных объектов мониторинга выбраны так называемые переходные зоны и прежде всего, – зональные биоклиматические экотоны, которые обладают повышенной чувствительностью как к фоновым изменениям

климата, так и к последствиям воздействия человека. Таковыми для Э.Г. Коломыца стали лесные экосистемы основного водосбора Волжского бассейна и его окружения. Здесь следует заметить, что трактовка понятия «био-мониторинг» весьма широка: от наблюдения за самими живыми организмами до контроля за состоянием каких-либо факторов среды при помощи живых организмов. И в последнем определении мы впервые сталкиваемся с методом биоиндикации как способом решения задач биологического мониторинга (но в биоиндикации, к сожалению, нет места географии).

Исследования в области разработки адаптивного управления лесным хозяйством имеют глобальное значение, а угроза сокращения лесного покрова планеты – общемировая проблема. Поэтому вполне оправдан раздел «Климато-генный мониторинг лесов в плане задач современной лесной экологии и адаптивного лесного хозяйства». «Адаптивное лесное хозяйство определяется как управляющая система, в которой проводятся целевые мероприятия, направленные на уменьшение уязвимости лесных экосистем или повышения их адаптационных способностей <...> [оно] направлено на экологически ориентированное управление лесами, поэтому геоэкологический мониторинг нацелен так или иначе на определённое освещение экологической ориентации лесопользования» (с. 28). В рамках совершенствования методов управления с новых позиций воспринимается необходимость выявления опасных факторов, их продолжительности и периодичности возникновения. Поддержание и развитие лесов (в рамках лесоводства, приближенного к природе), способных к самовосстановлению, является одной из основных задач адаптивного управления.

Вторая, третья и четвёртая части монографии посвящены трём основным типам мониторинговой деятельности – наблюдениям (оценке состояния), контролю (прогнозированию) и регулированию (управлению) природными экосистемами. Вторая часть состоит из четырёх глав (глава 3 «Эмпирические основы геосистемного мониторинга»; глава 4 «Методы локального ландшафтно-экологического моделирования»; глава 5 «Механизмы формирования лесных экосистем как научно-методическая основа мониторинга»; глава 6 «Функциональные состояния и устойчивость лесных экосистем»).

Методы экологического (в т. ч. локального ландшафтно-экологического) моделирования многочисленны (глава 4 монографии). Чуть

перефразирую французского математика и физика А. Пуанкаре (Jules Henri Poincaré; 1854–1912), сказавшего ещё в конце XIX века (заменяя «физика» и «физику» на «эколога» и «экологию»): «Цель математической экологии заключается не только в том, чтобы облегчить экологу вычисление некоторых постоянных или интегрирование дифференциальных уравнений. Она состоит ещё и в том, чтобы знакомить эколога со скрытой гармонией вещей, показывая их ему под новым углом зрения» (Пуанкаре, 1983, с. 222). Составить единую классификацию математических моделей, различающихся по назначению, используемой информации, технологии конструирования и т. п., принципиально невозможно, хотя версий таких классификаций существует достаточно много. Э.Г. Коломыц предлагает свой вариант классификации. «Мы конструируем не вообще экологические модели, а модели географической экологии, а именно модели ландшафтно-экологические (а не ауто- или синэкологические), где в категорию «хозяин» входят не только биотические, но и некоторые абиотические компоненты природной среды, которые на более низком иерархическом уровне служат исключительно экологическими факторами и где поэтому проще искать связи. Далее, вслед за В.С. Преображенским (1969), «соответственно, различают два основных типа моделей ландшафтной организации – моно-системный и полисистемный» (с. 104).

Мне представляется, что классификация моделей «по наукам» не очень удачна (какие особые модели будут, например, для химической экологии? более того, Э.Г. Коломыц далее, кроме разделов 4.2 и 4.3, практически нигде даже не упоминает эту классификацию). Включение географии в моделирование экосистем можно достичь, например, используя модели с пространственно распределёнными переменными и параметрами. Фактически об этом говорит и сам автор: «Несомненным проявлением гео (эко-) систем можно считать наличие в них некоторых механизмов компенсации временного разнообразия пространственным распределением и – наоборот» (с. 132). Учёт характера пространственного распределения параметров экосистем лежит и в основе пространственно распределённых ГИС, и экологических экспертных систем – например, REGION.

Третья часть монографии, где описан «Второй этап мониторинга – контроль (прогнозирование)» (глава 7 «Методика ландшафтно-экологического прогнозирования»; глава 8

«Локальные гидротермические условия и их прогнозные оценки»; глава 9 «Прогнозные сценарии преобразований лесных экосистем»; глава 10 «Эмпирическая имитация климатогенных изменений биологического круговорота»), как уже отмечалось, даёт представление об авторском видении теории и методов геосистемного мониторинга и его ключевого этапа – ландшафтно-экологического прогнозирования. Такого рода прогнозирование понимается как предвидение и оценка возможных изменений ландшафтных комплексов под воздействием природных и антропогенных факторов. «Ландшафтно-экологический прогноз в пределах ближайших столетий должен рассматривать в первую очередь не структурную эволюцию гео (эко-) систем, а направленную смену их функционирования, т. е. сдвиги в малом биологическом круговороте» (с. 53). Здесь следует согласиться с Э.Г. Коломыцем в том, что «именно методические трудности перехода от глобального прогноза к региональному, где резко возрастает число входных переменных, определяющих гидротермический режим гео(эко-) систем, являются одной из причин того, что региональный уровень прогнозирования остаётся ещё слабо разработанным. Для этого уровня приходится создавать свою методику экологических прогнозов» (с. 19). Далее автор обсуждает оригинальную процедуру локального ландшафтно-экологического прогнозирования, основанную на дискретном эмпирико-статистическом моделировании экосистем (привлекая методы теории информации и теории дескриптивных, «размытых» множеств).

«Третий этап мониторинга – управление (адаптация, обратная связь, регуляция)» – так называется последняя, четвертая часть монографии (глава 11 «Механизмы устойчивости лесных экосистем»; глава 12 «Прогноз функциональных параметров экосистем и изменений углеродного цикла»; глава 13 «Экологические ресурсы бореальных и неморальных лесов в регуляции углеродного цикла и смягчении современного глобального потепления»).

Следует принять во внимание, что сама система мониторинга не включает деятельность по управлению качеством среды, но, в идеале, является источником информации, необходимой для принятия некоторых экологически значимых решений. С.В. Саксонов отмечал: «В процессе мониторинга <...> создаются условия для определения корректирующих дей-

ствий в тех случаях, когда целевые показатели критериев оценки качества среды не достигаются». В этом контексте интересны рассуждения Э.Г. Коломыца об устойчивости природных экосистем и формах их адаптации (раздел 11.1). Автор (с. 362–363) придерживается точки зрения, что существует два альтернативных типа устойчивости экосистем: упругость (*resilience*) экосистемы как её способность возвращаться к исходному состоянию после возмущения, воспроизводя свою основную структуру и функционирование, и резистентность (*resistance*) экосистемы, её сопротивляемость к переходу в другую систему.

Вообще-то, типов устойчивости значительно больше (надёжность, устойчивость по Ляпунову, Лагранжу, Холлингу [*resilience*], Флейшману [живучесть, *resistance*], Свирежеву [иерархическая устойчивость] и пр.); в основе каждой из них лежит конкретная математическая модель. Именно это и свидетельствует о том, что не существует одного типа механизма управления устойчивостью экосистем. Для меня большой интерес представляет оригинальное дальнейшее различение (детализация) типов устойчивости (ареальная – миграционная, лабильная [фитоценоотическая] – инерционная [почвенно-биотическая]). В рамках последнего деления Э.Г. Коломыц для количественной оценки устойчивости предлагает систему индексов (с. 367–369, 373–375). У всех этих индексов один недостаток: за ними не стоят какие-либо оптимизационные математические модели. Но это недостаток не только автора; это общая проблема эмпирико-статистического моделирования, которое по своей сути не призвано выполнять функцию объяснения и обосновывать причинно-следственные связи. Талант и интуиция естествоиспытателя в этом случае позволяют приходиться к достаточно конструктивным выводам, например, «лабильная фитоценоотическая устойчивость может быть принята (в первом приближении) в качестве показателя общей устойчивости лесной экосистемы, в том числе инерционной, связанной с гораздо более длительным почвенно-биотическим циклом метаболизма. Меры лабильной устойчивости основываются на более простых и более строгих соотношениях параметров биологического круговорота по сравнению с мерами устойчивости инерционной, где приходится иметь дело с весьма различными характерными временами метаболических предикторов и, в частности,

с необходимостью разделения гумуса на лабильную и консервативную фракции» (с. 376).

Буквально пару слов о собственно управлении экосистемами. Э.Г. Коломыц совершенно справедливо считает необходимость осуществления управления природной средой за счёт поддержания их биоразнообразия (можно говорить об осторожном (предупредительном) управлении биоразнообразием), устойчивости (эластичности) и продуктивности, а также их способности выполнять экологические функции (в частности, смягчение климатических колебаний (митигация – mitigation; этап или компонент управления чрезвычайными ситуациями и рисками). В контексте книги основная цель митигации – уменьшение выбросов парниковых газов и сокращение причин, вызывающих глобальное потепление. Здесь же можно рекомендовать автору дать «лесной» комментарий «семи столпам» (основным принципам) управления природными ресурсами и экосистемами. При этом, необходимо учитывать, что во всех парадигмах управления не существует «правильного» решения, а есть те решения, которые наилучшим образом отвечают текущим и будущим потребностям общества, выраженным в процессе принятия решений (кстати, следует рассматривать и неправильные управленческие решения, в том числе, «решение не принимать решение»).

Завершая рецензию, отмечу, что очередной монографии Э.Г. Коломыца можно поставить самую высокую оценку. Можно

согласиться и с редактором монографии профессором Б.И. Кочуровым, которое высказано в его «Предисловии», что «книга Э.Г. Коломыца – это пример серьёзного осмысления на основе полученных многочисленных экспериментальных данных состояния лесных гео(эко-) систем, играющих важную средо- и ресурсоформирующую роль в биосфере» (с. 3). «В книге изложена авторская парадигма теории и методов геосистемного мониторинга и его ключевого этапа — ландшафтно-экологического прогнозирования» (с. 467). Основная задача экологического мониторинга лесных экосистем состоит в накоплении, систематизации и анализе информации о количественном характере взаимоотношений между живыми организмами и средой их обитания с целью оценки качества изучаемых экосистем, выявления причин наблюдаемых и вероятных структурно-функциональных изменений биотических компонентов и адресной индикации источников и факторов негативного внешнего воздействия, прогноза устойчивости экосистем и оценки существующих резервов биосферы и тенденций в их исчерпании (накоплении). Как и требуется от фундаментального (академического) труда, в этой монографии поставлено больше вопросов, чем даётся ответов на них.

*Г. С. Розенберг, д. б. н., профессор,
член-корреспондент РАН,
Институт экологии Волжского бассейна
РАН – филиал Самарского федерального
исследовательского центра РАН*

Рецензия на монографию А. Н. Соловьёва

«Заветные места земли вятской»

(Киров: ООО «Веси», 2024. 326 с.)

Review of the monograph by A. N. Soloviev “Cherished Places of the Vyatka Land” (Kirov: ООО “Vesi”, 2024. 326 p.)



Автор – доктор биологических наук, кандидат географических наук – известный инициатор охраны примечательных природных территорий, посвятивший этому более полвека своей творческой деятельности. В спектр его исследований входят как биотические, абиотические и биокосные компоненты, так и их более сложные геоэкологические образования – от небольших урочищ до зональных ландшафтов в целом. Диапазон его научных работ охватывает широкий спектр направлений – от сезонной динамики биоты до заповедания территорий. Альберт Николаевич – автор 13 монографий, более 250 научных и более 400 научно-популярных публикаций, отличающихся неординарностью подхода в решении многих экологических и социальных проблем. И данное издание отличает сочетание образности и лёгкости изложения даже сложных

теоретических вопросов экологии с высоконаучным обоснованием их практического решения. Автор подводит читателя к пониманию, что сохранить природу можно только возрождением высоких духовно-нравственных начал, которые сложились в сознании и практике местных этнокультурных сообществ. Возродить сакральное отношение социума к природе – таков основной лейтмотив учёного, неустанно выявляющего и отстаивающего ценное природное и природно-культурное наследие.

В книге «Заветные места земли вятской» характеризуются особенности природы одной из крупнейших областей в зоне тайги и смешанных лесов. Приведены подробные описания привлекательных уголков Кировской области – памятников природы: ландшафтных, геологических и палеонтологических, геоморфологических, водных, биологических, включая и те, которые лишились этого статуса. Изложена история выявления и организации охраны памятников природы с объяснением этого понятия, проблемы их сохранения.

В отношении памятников природы он подчёркивает, что придание природной достопримечательности этого статуса – лишь повод к охране, но не собственно охрана. Многие из них нуждаются в проведении определённых мероприятий по сохранению научного и познавательного потенциала. Автор убедительно аргументирует нешаблонный подход к охране природных достопримечательностей. На примере редчайшего на скальных участках берега р. Немда в Советском районе. При сложившемся режиме полного невмешательства это светолюбивое растение исчезает под пологом поднимающейся древесной растительности. Для спасения скальной флоры и самих скал необходимо восстановление их безлесного состояния, которое ранее поддерживалось хозяйственным использованием жителями исчезнувших деревень, повышение доступности для туристов и отдыхающих до бывшего

уровня антропогенной нагрузки. В мировой природоохранной практике давно признано, что абсолютная заповедность в экосистемах, веками испытывавших антропогенную нагрузку (степные, наскальные и др.), приводит к их трансформации, исчезновению редких видов.

В приложении представлена методика учёта земель особо охраняемых природных территорий с нанесением их границ на планово-картографическую основу и подсчётом площадей по принципу иерархии уровней

охраны. Книга богато иллюстрирована. От первой до последней страницы прослеживается направленность на формирование осмысленного отношения к природным достопримечательностям.

*А. М. Прокашев, д. с.-х. н., профессор
Вятского государственного университета,
Т. Г. Шихова, к. б. н., с. н. с. Всероссийского
НИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б. М. Житкова*

Приглашаем принять участие в работе

**II Международной научно-практической конференции
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»
г. Киров, 23–24 апреля 2025 г.**

Основные научные направления работы конференции:

1. Научные исследования и разработки в области экологии.
2. Экологические проблемы регионов, пути решения.
3. Экологический мониторинг состояния окружающей среды.
4. Химия и экология почв.
5. Химия и экология микроорганизмов.
6. Биология и экология растений.
7. Биология и экология животных.
8. Социальная экология и здоровье.
9. Цифровые технологии в экологии.
10. Отходы производства и потребления: экологические аспекты.
11. Экологическое образование и воспитание.

Организаторы конференции:

Вятский государственный университет,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук, Ляонинский институт науки и технологии.

Контакты: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>
e-mail: confbioeco@gmail.com
Тел. 8(8332)37-02-77

Профессиональная ориентация школьников в системе естественно-научного и географического образования

© 2025. Н. В. Соколова¹, к. п. н., ректор,
Н. В. Носова¹, к. п. н., зав. кафедрой,

Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
¹Институт развития образования Кировской области,
610046, Россия, г. Киров, ул. Романа Ердякова, д. 23/2,

²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

³Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

На научно-практической конференции учителей географии, биологии, химии обсуждались вопросы научно-методического сопровождения педагогов в профессиональной ориентации школьников, системы профориентационной работы в образовательных организациях Кировской области, а также выявления, поддержки и развития способностей детей в области биологии, химии и географии на базе Центра дополнительного образования одарённых школьников. Центральное место в проводимых на конференции мероприятиях было отведено распространению опыта работы педагогов по вопросам профессиональной ориентации школьников в системе естественно-научного и географического образования в форме презентации проектной деятельности, мастер-классов, дискуссий. Весьма полезной для учителей была организована выставка и встреча с представителями ведущих вузов города, которые поделились опытом по организации мероприятий «Социальное партнёрство: школа-вуз».

Ключевые слова: профориентационная работа, передовой педагогический опыт работы, социальное партнёрство.

Vocational guidance for schoolchildren in the system of natural science and geographical education

© 2025. N. V. Sokolova¹ ORCID: 0009-0000-9517-7527^{*}
N. V. Nosova¹ ORCID: 0009-0005-8038-3586^{*}

T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047^{*}

¹Institute of Education Development of Kirov Region,
23/2, R. Erdyakova St., Kirov, Russia, 610046,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Institute of Biology of the Komi Science Centre of the
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: ecolab2@gmail.com

At the scientific and practical conference of teachers of geography, biology, chemistry, issues of scientific and methodological support for teachers in the vocational guidance of schoolchildren, the system of career guidance in educational organizations of the Kirov region, as well as the identification, support and development of children's abilities in the field of biology, chemistry and geography were discussed on the basis of the Center for Additional Education of Gifted Schoolchildren. The central place in the events held at the conference was given to the dissemination of teachers' experience in matters of professional orientation of schoolchildren in the system of natural science and geographical education in the form of presentation of project activities, master classes, discussions. The exhibition and meeting with representatives of the city's leading universities, who shared their experience in organizing events "Social partnership: school-university", were very useful for teachers.

Keywords: career guidance work, advanced teaching experience, social partnership.

На базе Института развития образования Кировской области 31 января 2025 г. состоялась 52-я областная научно-практическая конференция учителей географии, биологии, химии «Профессиональная ориентация школьников в системе естественно-научного и географического образования».

Актуальность данной темы обусловлена одной из стратегических задач системы образования, которая заключается в осознанном выборе обучающихся будущей профессии и подготовке востребованных кадров для экономики региона.

Безусловно, решение этой задачи требует комплексного подхода с учётом реализации направлений профминимума. В общеобразовательных организациях осуществляется углублённое и профильное изучение естественно-научных предметов, организуется внеурочная деятельность, проводится работа с родителями, реализуются проекты с участием социальных партнёров, ведущих предприятий региона, образовательных организаций всех уровней.

Основной целью проведения конференции является распространение опыта работы педагогов образовательных организаций по вопросам профессиональной ориентации школьников в системе естественно-научного и географического образования.

В конференции приняли участие представители министерства образования Кировской области, Вятского государственного университета, Кировского государственного медицинского университета, Вятского государственного агротехнологического университета, а также специалисты из кластеров федерального проекта «Профессионалитет» – Вятский автомобильно-промышленный колледж, колледж Вятского государственного агротехнологического университета, Кумёнский аграрно-технологический техникум, Кировский технологический техникум пищевой промышленности, Кировский медицинский колледж, сотрудники предприятий «УРАЛХИМ» г. Кирово-Чепецка и биофармацевтической компании «Нанолек». Главными участниками мероприятия были руководители, заместители руководителей, методисты, педагоги образовательных организаций Кировской области.

Всего в конференции участвовало более 160 человек из всех образовательных округов, 38 муниципалитетов Кировской области. Наибольшее представительство составили педагоги Кильмезского, Санчурского, Юрьянского, Яранского районов, а также городов Кирова, Кирово-Чепецка, Котельнича и Слободского.

С приветственными словами к участникам конференции обратились министр образования Кировской области О.Н. Рысева, ректор Института развития образования Кировской области Н.В. Соколова, заведующий лабораторией биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ Т.Я. Ашихмина, которые отметили важность и актуальность обсуждаемой тематики на данной конференции.

На пленарном заседании с докладами выступили: А.С. Лялин, руководитель Центра опережающей профессиональной подготовки «О реализации приоритетных направлений в сфере профориентационной работы в Кировской области», Н.В. Носова, заведующий кафедрой предметных областей ИРО Кировской области «О научно-методическом сопровождении педагогов по вопросам профессиональной ориентации школьников», Е.Н. Перминова, директор Центра дополнительного образования одарённых школьников «О системе выявления, поддержки и развития способностей детей в области биологии, химии и географии».

После пленарного заседания была организована работа секций, на которых были представлены инновационные проекты, реализуемые учителями географии, биологии и химии на уроках и во внеурочной деятельности.

В своих выступлениях учителя раскрывали вопросы пропедевтики, углублённого и профильного изучения естественно-научных предметов, показывали профориентационный потенциал урочной и внеурочной деятельности, рассказывали об активных формах и методах профориентационной работы с обучающимися, демонстрировали возможности использования инфраструктуры «Точек роста», IT-кубов, кванториумов в образовательном процессе. Также педагоги представили опыт работы сетевых профильных классов, классов медицинской, агротехнологической направленности, презентовали результаты проектов, выполненных при взаимодействии с социальными партнёрами.

В ходе конференции была организована интерактивная выставка и встреча с представителями предприятий и образовательных организаций, которые предоставили возможность педагогам более подробно узнать о направлениях подготовки и специальностях в профессиональных образовательных организациях и образовательных организациях высшего образования. Нет сомнения в том,

что такое взаимодействие «школа-колледж-предприятие», «школа-вуз-предприятие» позволит оказать помощь ученикам в профессиональном самоопределении.

Таким образом, в ходе конференции был рассмотрен широкий круг теоретических, методических и организационных вопросов, участники областной научно-практической конференции отметили важность и значимость обозначенных проблем и тенденций в организации профориентационной работы со школьниками.

К началу конференции был издан сборник материалов учёных и педагогов, занимающихся вопросами профориентации школьников, «Профессиональная ориентация школьников в системе естественно-научного и географического образования».

При подведении итогов конференции от педагогов поступили ценные рекомендации и предложения:

- рассмотреть вопрос о расширении сети профильных классов, медицинских, агротехнологических и классов с углублённым изучением химии и биологии;

- продолжить отработку механизмов взаимодействия общеобразовательных организаций с колледжами и вузами;

- продолжить научно-методическое сопровождение педагогов по вопросам организации профориентационной работы со школьниками;

- обобщить лучшие практики образовательных организаций по вопросам организации профориентационной работы;

- транслировать на муниципальном уровне опыт образовательных организаций и педагогических работников по вопросам профессиональной ориентации школьников;

- внести в план работы муниципальных методических объединений педагогов рассмотрение вопросов профориентационного потенциала урочной, внеурочной деятельности, дополнительного образования;

- рекомендовать педагогам для использования в работе материалы областной научно-практической конференции учителей географии, биологии, химии;

- изучать, обобщать и распространять опыт работы педагогов по вопросам профессиональной ориентации школьников;

- применять в урочной, внеурочной деятельности, дополнительном образовании, при работе с родителями активные формы, методы и средства обучения, влияющие на выбор будущей профессии.

Участники конференции, отмечая безусловную важность и актуальность её проведения, выразили уверенность, что рекомендации, выработанные на конференции, будут содействовать дальнейшему развитию профориентации в образовательных организациях, способствовать профессиональному самоопределению школьников и развитию экономики региона.

Н. В. Соколова, Н. В. Носова, Т. Я. Ашихмина
«Профессиональная ориентация школьников
в системе естественно-научного
и географического образования». С. 226



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004