



2024

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 3

**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

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>

Реализация инновационного проекта государственного значения «ЕДИНАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ»



**Директор Института биологии
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
И.Ф. Чадин**

Правительством Российской Федерации издано распоряжение об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (от 29.10.2022 № 3240-р). Создание системы учёта эмиссии и поглощения углерода в наземных экосистемах было поручено консорциуму «РИТМ углерода» (<https://ritm-c.ru>), в который вошли 22 научно-исследовательские организации и высшие учебные заведения страны. Головной организацией консорциума является Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук (ЦЭПЛ РАН). Координирует работу консорциума директор ЦЭПЛ РАН член-корреспондент РАН, доктор биологических наук Наталья Васильевна Лукина.

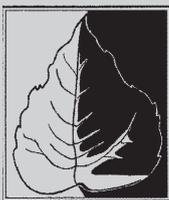
В состав этого консорциума вошел ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Основная часть работ по задачам, поставленным руководством консорциума перед ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, выполняется на базе Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, имеющего многолетний опыт работы в данном направлении. В этой работе участвуют крупнейшие отделы Института: отдел лесобиологических проблем Севера, отдел почвоведения, отдел флоры и растительности Севера с научным гербарием, отдел экологии животных. Большой объём аналитических работ выполняется на базе экоаналитической лаборатории Института.

В 2024 году специалисты Института биологии работают на двух полигонах, которые находятся на территории Республики Коми. Один из этих полигонов организован на территории заказника республиканского значения «Пяльский» в Княжпогостском районе Республики. Исследованиями руководит Светлана Витальевна Загирова, заведующая отделом лесобиологических проблем Севера, доктор биологических наук. На территории полигона заложено 30 постоянных пробных площадей, на

которых будет проводиться долговременный наземный и дистанционный мониторинг парниковых газов и запасов углерода в растениях и почве лесных фитоценозов углерода. Территория данного полигона характеризуется очень высоким разнообразием почвенного и растительного покрова, что обусловлено рельефом, условиями увлажнения и историей освоения этой территории.

Второй полигон расположен в Усть-Куломском районе Республики. Руководит работами на этом полигоне ведущий научный сотрудник отдела почвоведения, доктор биологических наук Алексей Александрович Дымов. Здесь постоянные пробные площади заложены на трёх участках, которые расположены на возвышенности Джемим Парма Южного Тимана: на территории малонарушенного елового леса, восьмилетней и восемнадцатилетней вырубок, на которых восстановление леса происходит естественным путём. Без оценки динамики содержания органического вещества в почве и растительном покрове на территории разновозрастных вырубок не получится составить адекватную оценку способности наших лесных экосистем к поглощению углерода из атмосферы.

Базы данных наземных и дистанционных наблюдений, созданные по результатам работы на всех полигонах консорциума «РИТМ углерода», будут интегрированы в единую информационно-аналитическую систему мониторинга климатически активных веществ и использованы в климатических моделях. В перспективе такая система может дать ответы и, возможно, новые аргументы в спорах относительно антропогенного вклада в глобальное потепление, поглощающей способности лесов и других экосистем, а также эффективности различных технологий декарбонизации.



Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 3, 2024
<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 (№2666 по состоянию на 08.07.2024).

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,
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, фотографии на 1-й и 4-й обложках – Александр Широких,
администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,
выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 30.09.2024.

Тираж 250 экз. Заказ № 3206. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография»

Адрес типографии: 610017, Кировская область,
г. Киров, ул. Анфисы Горбуновой, 23

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
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- 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 государст-
венного 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
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор
Международного института логистики
ресурсосбережения и технологической инноватики
(НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, зав. отделом и зав.
лабораторией Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лажнецов** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, про-
фессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор
Института микологии Цзилиньского аграрного университета
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям
Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государст-
венного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН,
зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского
государственного университета
- 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., доцент, профессор Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского
государственного технического университета
- 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. 3, 2024

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. Kut'yavina, PhD in Biology,

Senior Researcher 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, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor,

Mariya Sazanova. Photo on the 1st and 4th cover –

Alexander Shirokikh. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman.

Managing editor – Mariya Zelayeva.

Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov.

© Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: September 30, 2024.

Circulation 250 copies. Order No. 3206. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD

Printing Address: 23, Anfisy Gorbunovoy St., Kirov, Russia, 610017

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
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- 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)
- M.Zh. 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. Kolomiyets** 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
- 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
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Head of Department and Head of Laboratory 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
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of 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, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union
- 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, Assistant Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- 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. Shiryayev** 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, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина*
Основные подходы к снижению запаха животного загрязнения окружающей среды предприятиями животноводства (обзор)6

СТАТЬИ

- Г. Ш. Цициашвили, В. Н. Бочарников, С. М. Краснопеев, М. А. Осипова* Графовые алгоритмы для расчёта распределения следов амурского тигра на территории Приморского края20
- Н. Г. Отченаш, И. И. Студёнов, И. Ю. Македонская, Е. В. Медведева, М. А. Студёнова, Г. В. Фукс, В. С. Шерстков, Р. А. Мельник, Л. В. Парухина* Определение величин кормового коэффициента и коэффициента использования кормовой базы рыбами-планктонофагами в нижнем течении реки Вычегды29
- В. А. Козвоин, Е. В. Товстик, А. А. Маслова, Е. Б. Дунаева* Возможности метода биохемилюминисценции с модельной средой из сыворотки крови в оценке антиоксидантной активности растительного сырья37
- М. А. Шумилова* Применение моделей адсорбции при исследовании поглощения ионов никеля почвой45
- П. В. Кочкарев, М. А. Перевозчикова, А. А. Сергеев, В. В. Ширяев, В. Н. Пиминов* Токсичные и биогенные элементы в органах и тканях белой куропатки (*Lagopus lagopus* L., 1758) на севере Красноярского края (обзор)54
- Т. В. Прокофьева, И. Е. Смирнова, Е. М. Лаптева, Е. В. Жангуров, Ю. В. Холопов* Опыт изучения трансформации подзолистых почв в условиях городской среды Севера64
- Е. В. Яковлева, М. И. Василевич, Д. Н. Габов* Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове заповедных территорий Республики Коми72
- Т. И. Зюбанова, О. М. Минаева, Е. Е. Акимова, Е. Б. Дайбова, Н. Н. Терещенко* Влияние предварительной биоконверсии пшеничной соломы в модельной природоподобной системе на продуктивность растений82
- А. М. Опарина, И. В. Ильин* Перспективы развития водородной энергетики на региональном примере92
- J. Yan, Z. Wang, T. Liu, Y. Chen* Preparation of heteropoly acid quaternary ammonium salt eco-friendly catalyst for diesel oil deep oxidative desulfurization102
- А. Р. Гальперина, О. Б. Сопрунова, А. Н. Пархоменко, С. В. Еремеева, А. Ш. Бареева* Фосфатмобилизующие микроорганизмы сельскохозяйственных растений аридных экосистем Астраханской области107
- Л. В. Кондакова, П. А. Стариков, Л. И. Домрачева* Специфика фототрофных наземных микробных комплексов в посевах пшеницы115
- И. Н. Кутявин, А. В. Манов, В. В. Старцев, А. А. Дымов* Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги123
- D. I. Stom, M. M. Dolgikh, I. N. Titov, G. V. Dambaeva, G. O. Zhdanova, A. D. Stom, K.-K. K.-K. Boguspaev, S. L. Maksimova, A. B. Kupchinsky* Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on soil oligochaetes *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972)133
- Н. Ю. Юдина, Т. Н. Козлова, М. Г. Зайцев, В. А. Самойленко, С. В. Алфёров* Лиофилизированные микроорганизмы как основа биочувствительного элемента БПК-биосенсора141

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕДИ ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

РЕМЕДИАЦИЯ
И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**ЭКОТОКСИ-
КОЛОГИЯ**

- Т. И. Кутявина, М. А. Сысолятина, Т. Я. Ашихмина* Распространение токсигенных цианобактерий в водных объектах на территории Восточно-Европейской равнины154
- А. И. Фокина, А. С. Олькова* Оценка степени высвобождения и токсичности соединений цинка, используемых в фармацевтических и косметических средствах165

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

- И. Н. Егорова, Г. С. Тушикова, О. В. Шергина, С. Г. Казановский* Почвенные водоросли и цианопрокариоты степных сообществ Байкальской котловины172
- А. А. Широких, И. Г. Широких* Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22 и его способности разлагать полиэтилен185
- П. П. Попов, М. Н. Казанцева, С. П. Арефьев* Индивидуальная и географическая изменчивость шишек *Picea obovata* в российской части ареала в связи с количеством семян в них192
- Е. Ю. Зарубина* Влияние абиотических факторов на продуктивность тростника *Phragmites australis* в озёрах юга Западной Сибири200
- О. А. Лоскутова, О. Н. Кононова, М. А. Батурина, В. И. Пономарев* Зообентос и зоопланктон малых рек бассейна реки Кобры (национальный парк «Койгородский»)210
- А. А. Кидов, Р. А. Иволга, Т. Э. Кондратова, О. С. Грода, В. В. Демянчик, В. О. Ерашкин, Е. А. Кидова* Влияние плотности посадки на личиночное развитие камышовой жабы (*Epidalea calamita*) (по результатам лабораторных исследований)217

**ЭКОЛОГИЯ
И КЛИМАТ**

- В. Е. Гловов, М. В. Ушаков* Климатические изменения годового стока рек Северного Приохотоморья226
- Y. M. Gordeeva, Yu. V. Fursa, K. L. Shahmatov* Drained peatlands rewetting as a promising trend for carbon offsets in Russia: legal and economic aspects234

ХРОНИКА

- Т. Я. Ашихмина* Четвёртая «Менделеевская экологическая экспедиция. Камчатка»240

CONTENTS

REVIEWS

- N. V. Syrchina, L. V. Pilip, T. Ya. Ashikhmina* Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review)6

ARTICLES

- G. Sh. Tsitsiashvili, V. N. Bocharnikov, S.M. Krasnopeev, M.A. Osipova* Graph algorithms for calculating the distribution of the Amur tiger tracks in Primorsky Krai20
- N. G. Otchenash, I. I. Studenov, I. Yu. Makedonskaya, E. V. Medvedeva, M. A. Studenova, G. V. Fuks, V. S. Sherstkov, R. A. Melnik, L. V. Paruhina* Determination of the values of feeding coefficient and the coefficient of feed utilization by planktonophagous fish in the lower reaches of the Vycheгда River29
- V. A. Kozvonin, E. V. Tovstik, A. A. Maslova, E. B. Dunaeva* Possibilities of the biochemiluminiscence method with a model environment from blood serum in assessing the antioxidant activity of plant materials37
- M. A. Shumilova* Application of adsorption models in the study of nickel ion absorption by soil45
- P. V. Kochkarev, M. A. Perevozchikova, A. A. Sergeev, V. V. Shiryaev, V. N. Piminov* 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)54
- T. V. Prokof'eva, I. E. Smirnova, E. M. Lapteva, E. V. Zhangurov, Yu. V. Kholopov* The experience of studying of the Albic Retisols antropogenic evolution in the urban environment of the North64

**THEORETICAL
PROBLEMS
OF ECOLOGY**

**METHODOLOGY
AND RESEARCH
METHODS.
MODELS AND
FORECASTS**

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

CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS

E. V. Yakovleva, M. I. Vasilevich, D. N. Gabov Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of protected areas of the Komi Republic 72

ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION

T. I. Zyubanova, O. M. Minaeva, E. E. Akimova, E. B. Daibova, N. N. Tereshchenko Effect of preliminary bioconversion of wheat straw on plant productivity in a model nature-like system 82

A. M. Oparina, I. V. Ilyin Prospects of hydrogen energy development based on a regional example 92

J. Yan, Z. Wang, T. Liu, Y. Chen Preparation of heteropoly acid quaternary ammonium salt eco-friendly catalyst for diesel oil deep oxidative desulfurization 102

AGROECOLOGY

A. R. Galperina, O. B. Soprunova, A. N. Parkhomenko, S. V. Ereemeeva, A. Sh. Bareeva Phosphate mobilizing microorganisms of agricultural plants in arid ecosystems of the Astrakhan region 107

L. V. Kondakova, P. A. Starikov, L. I. Domracheva Specificity of phototrophic terrestrial microbial complexes under wheat crops 115

REMEDIATION
AND RECULTIVATION

I. N. Kutyavin, A. V. Manov, V. V. Starcev, A. A. Dymov The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga 123

ECOTOXICOLOGY

D. I. Stom, M. M. Dolgikh, I. N. Titov, G. V. Dambaeva, G. O. Zhdanova, A. D. Stom, K.-K. K.-K. Boguspaev, S. L. Maksimova, A. B. Kupchinsky Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on soil oligochaetes *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972) 133

N. Yu. Yudina, T. N. Kozlova, M. G. Zaytsev, V. A. Samoilenko, S. V. Alferov Lyophilized microorganisms as a basis for biosensitive element of a BOD-biosensor 141

T. I. Kutyavina, M. A. Sysolyatina, T. Ya. Ashikhmina Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain 154

A. I. Fokina, A. S. Olkova Assessment of the release rate and toxicity of zinc compounds used in pharmaceuticals and cosmetics 165

POPULATION
ECOLOGY

I. N. Egorova, G. S. Tupikova, O. V. Shergina, S. G. Kazanovsky Soil algae and cyanoprokaryota of steppe communities of the Baikal basin 172

A. A. Shirokikh, I. G. Shirokikh Characteristics of the *Schizophyllum commune* new strain EO22 and its ability to degrade polyethylene ... 185

P. P. Popov, M. N. Kazantseva, S. P. Arefyev Individual and geographic variability of *Picea obovata* cones in the Russian part of its area in relation to the seeds quantity in them 192

E. Yu. Zarubina Abiotic factors affect the *Phragmites australis* productivity in lakes in the south of Western Siberia 200

O. A. Loskutova, O. N. Kononova, M. A. Baturina, V. I. Ponomarev Zoobenthos and zooplankton in small rivers of the Kobra River basin (National park "Koygorodsky") 210

A. A. Kidov, R. A. Ivolga, T. E. Kondratova, O. S. Groda, V. V. Demyanchik, V. O. Erashkin, E. A. Kidova Effect of stocking density on larval development of the Natterjack toad (*Epidalea calamita*), based on the laboratory results 217

ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE

V. E. Glotov, M. V. Ushakov Climatic changes in annual river runoff of the Northern Okhotsk Sea region 226

Y. M. Gordeeva, Yu. V. Fursa, K. L. Shahmatov Drained peatlands rewetting as a promising trend for carbon offsets in Russia: legal and economic aspects 234

CHRONICLE

T. Ya. Ashikhmina The fourth "Mendeleev Ecological Expedition. Kamchatka" 240

Основные подходы к снижению запахового загрязнения окружающей среды предприятиями животноводства (обзор)

© 2024. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,

Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,

²Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

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

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

Функционирование современного промышленного животноводства сопровождается выбросами в окружающую среду широкого спектра запахообразующих веществ (ЗОВ), оказывающих негативное влияние на здоровье и качество жизни населения. Проблема защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения (ЗЗ) актуальна и практически значима. В данном обзоре даётся критическая оценка научных публикаций, посвящённых контролю ЗЗ, источниками которого являются животноводческие и птицеводческие предприятия. Рассматриваемые авторами методы контроля включают обработку навоза/помёта дезодорирующими материалами (реагентами, сорбентами, ферментами и др.); инокуляцию штаммами микроорганизмов; корректировку рационов животных; очистку воздуха от загрязняющих веществ; оптимизацию рассеивания ЗОВ; изоляцию источников ЗЗ; маскировку запаха. Ориентация сельского хозяйства на внедрение зелёных технологий усилила интерес к поиску экологически безопасных методов борьбы с запахом. К таким методам можно отнести применение растительных экстрактов, натуральных сорбентов, эффективных штаммов микроорганизмов, биофильтров, биоскрубберов, биогазовых установок, посадку защитных лесополос, способствующих поглощению пыли и дисперсии ЗОВ. Каждый метод контроля ЗЗ имеет свои преимущества и недостатки. Современные «зелёные» методы, позволяющие эффективно устранять запах на крупных предприятиях, требуют высоких инвестиционных и эксплуатационных затрат, что ограничивает их внедрение в практику, а относительно низкзатратные методы (применение реагентов, сорбентов, ароматизаторов, кормовых добавок) обычно недостаточно эффективны. Приемлемый результат можно получить за счёт комбинирования различных методов ограничения эмиссии ЗОВ. Стратегию контроля выбирают с учётом источника запаха, эффективности технологии в условиях конкретного хозяйства, а также соотношения затрат к получаемой экономической выгоде от внедрения технологии контроля запаха в практику.

Ключевые слова: животноводство, птицеводство, навоз, помёт птиц, запах, способы снижения запаха.

Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review)

© 2024. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[†]

L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146[†]

T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

¹Vyatka State University,

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

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Pr., Kirov, Russia, 610017,

³Institute 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, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Modern industrial livestock production is accompanied by emissions into the environment of a wide range of odor-forming substances (OFS), which negatively affect the health and quality of life of the population. The problem of protecting atmospheric air from odour pollution (OP) is of high relevance and practical significance. The review critically appraises scientific publications on the control of OP from livestock and poultry farms. Methods of control include the processing of manure with deodorizing materials (reagents, sorbents, enzymes, etc.); inoculation with microorganism strains; adjustment of animal diets; air purification from pollutants; optimization of dispersion; isolation of OP sources; and odor masking. Agriculture's focus on adopting green technologies has increased interest in searching environmentally friendly methods of odor control. These are the use of plant extracts, natural sorbents, effective microorganism strains, biofilters, bioscrubbers, biogas plants, planting of protective forest belts that promote the absorption of dust and dispersion of OFS. Each method of OP control has both advantages and disadvantages. Modern "green" methods effectively eliminate odors in large farms, but require high investment and operating costs, which limits their implementation in practice, and relatively low-cost methods (the use of reagents, sorbents, flavoring agents, feed additives) are usually not effective enough. An acceptable result can be obtained by combining various methods of limiting the OFS emission. Control strategies should be selected based on the source of the odor, the effectiveness of the technology on the particular farm, and the cost/benefit ratio of the odor control technology into practice.

Keywords: livestock farming, poultry farming, manure, bird droppings, odor, odor reduction methods.

Запаховое загрязнение (ЗЗ) окружающей среды (ОС) обусловлено наличием в атмосферном воздухе определённых веществ, обнаруживаемых органами обоняния человека. Особые проблемы в плане ЗЗ вызывают летучие соединения (ЛС) с очень низким порогом восприятия, которые находятся в воздухе в незначительной концентрации. Неприятные навязчивые запахи (НЗ) оказывают выраженное раздражающее воздействие на психическое состояние, здоровье, работоспособность и качество жизни населения. В связи с этим во многих странах предпринимаются серьёзные усилия, направленные на контроль ЗЗ и внедрение технологий, позволяющих минимизировать выбросы запахообразующих веществ (ЗОВ) в атмосферный воздух [1, 2]. Ужесточение требований к качеству атмосферного воздуха характерно и для РФ. В 2019 г. в России началась реализация федерального проекта «Чистый воздух», в котором поставлена задача снизить объёмы выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) на 2 млн т к 2026 г. С 1 января 2024 г. вступил в силу Федеральный закон от 28.04.2023 № 177-ФЗ, в соответствии с которым в городах-участниках проекта «Чистый воздух» квотируемые объекты I и II категорий будут оснащены приборами автоматического контроля выбросов «приоритетных» ЗВ. Одновременно начало действовать Распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р, расширяющее перечень ЗВ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования. Многие вещества, включённые в обновлённый перечень, обладают НЗ (галогенопроизводные углеводородов, спирты, фенолы, альдегиды, серосодержащие соединения, амины и др.). В связи с принятыми документами природоохранная документация объектов,

оказывающих негативное воздействие на ОС (НВОС) потребует уточнения и доработки. В число таких объектов входят предприятия по разведению сельскохозяйственных животных и птицы. В зависимости от проектной мощности и производительности соответствующие объекты относят к I (значительное НВОС) или II (умеренное НВОС) категориям [3, 4].

В процессе деятельности птицеводческих и животноводческих предприятий в ОС поступает широкий перечень разнообразных ЗВ, при этом особое раздражение населения вызывают вещества, обладающие НЗ [5, 6]. Основной вклад в формирование ЗЗ вносят системы накопления и обезвреживания побочных продуктов животноводства (ППЖ): помёта птиц, подстилки, навоза, навозных стоков (НС) [7]. Проблема устранения ЗЗ, связанного с функционированием животноводческих комплексов, представляет высокую актуальность и практическую значимость.

Цель работы – систематизировать и критически оценить мировой опыт и перспективные научные разработки в сфере устранения запахового загрязнения окружающей среды животноводческими и птицеводческими предприятиями.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор, направленный на структурирование, критический анализ и обобщение опубликованных данных по рассматриваемой проблеме. Базу обзорной статьи составляют результаты научных исследований, посвящённых вопросам снижения ЗЗ, за период с 2000 по 2024 гг. Для поиска источников научной и технической информации использовали сервисы Scopus, Web of Science,

Google Scholar, eLIBRARY, КиберЛенинка, Академия Google, ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Подбор публикаций проводили по таким ключевым словам, как: животноводство, навоз, навозные стоки, побочные продукты животноводства, методы устранения запаха, наилучшие доступные технологии, а также по ключевым словам из научных статей аналогичной тематики. Ключевые слова использовали в русскоязычном и англоязычном вариантах с корректировкой лексического значения терминов. Кроме электронного поиска в международных и национальных базах данных применяли ручной поиск релевантной информации в ведущих научных и отраслевых журналах, библиографических списках, материалах конференций, книгах и других изданиях. При обзоре предметного поля ориентировались на нелинейный характер отбора публикаций. Особое внимание уделяли вопросам, связанным с экологическими аспектами внедрения предлагаемых технологий, затратами на их реализацию, возможностью применения в условиях РФ.

Запаховое загрязнение окружающей среды предприятиями животноводства

Современное интенсивное животноводство, характеризующееся концентрацией значительного поголовья на ограниченных площадях, является источником выраженного ЗЗ как на территории самих предприятий, так и за её пределами. Основной вклад в ЗЗ вносят процессы микробиологической и ферментативной конверсии корма в толстом кишечнике животных, а также неполное микробиологическое разложение экскрементов в анаэробных условиях, в результате чего в ОС поступает значительное количество ЛС [8–10]. Согласно [11], ежедневные выбросы ЛС из кала крупного рогатого скота (КРС) достигают 1,75 г, а из мочи 1,52 г на 1 голову (или 638,8 г из кала и 554,8 г из мочи в год). Запах навоза КРС обусловлен наличием широкого спектра летучих жирных кислот (энантовой, капроновой, изомазляной, изовалериановой и др.), гетероциклических соединений (индола, скатола), серосодержащих органических соединений (диметилдисульфида, диметилтрисульфида) [12].

Сложный многокомпонентный состав ЗОВ характерен и для свиного навоза, в котором идентифицировано до 400 ЛС. Особый вклад в формирование запаха свиных НС вносят п-крезол, скатол, 4-этилфенол, 4-метилфенол,

уксусная кислота, NH_3 , H_2S , диметилсульфид, диметилдисульфид и диметилтрисульфид [13, 14], а также триметиламин, масляная, пропионовая, валериановая и изовалериановая кислоты [15]. По имеющимся оценкам, объёмы выбросов летучих органических веществ (ЛОС), NH_3 и H_2S из свиарников составляют 0,4; 2,8 и 0,1 кг/год на 1 свинью соответственно [16].

Запах куриного помёта обусловлен сочетанным воздействием на органы обоняния до 150 соединений, включая летучие жирные кислоты (ЛЖК), меркаптаны, сложные эфиры, карбонилы, альдегиды, спирты, аммиак, амины. Годовые выбросы ЛОС от одной курицы достигают 405 г/год [17, 18].

Если принять среднюю массу 1 коровы за 500 кг, свиньи – 100 кг, курицы – 4 кг, то выбросы ЛС из навоза КРС, свиней и помёта кур составят 2,4; 33,0; 101,0 г на 1 кг массы животного в год соответственно.

Борьба с распространением НЗ представляет весьма сложную проблему, обусловленную специфическим химическим составом ППЖ (значительным содержанием биогенных органических компонентов, в результате микробиологической деструкции которых образуются различные по химической природе ЗОВ); высоким выходом ППЖ на единицу основной продукции; длительным периодом биологической деградации (минерализации) органических веществ, входящих в состав ППЖ; низким порогом восприятия запаха биогенных ЗОВ; неготовностью населения мириться с наличием НЗ [19–21].

В настоящее время опубликовано значительное количество работ, посвящённых проблеме контроля ЗЗ. Предлагаемые решения включают корректировку рациона животных; обработку ППЖ для ограничения интенсивности гнилостных процессов и эмиссии ЗОВ; очистку воздуха от ЗВ; оптимизацию рассеивания ЗОВ; изоляцию источников ЗЗ; маскировку (изменение гедонистического тона) запаха [16, 22]. Так, для снижения интенсивности НЗ американским фермерам рекомендуется подавлять микробиоту ППЖ с помощью биоцидных препаратов, дезинфицирующих средств, регуляторов pH, охлаждения, пастеризации или высушивания; хранить ППЖ в таких местах, в которых НЗ вызывают меньше проблем для населения; корректировать рацион животных в сторону уменьшения содержания в кормах азота и серы; регулировать нагрузку лагун таким образом, чтобы выделяющиеся ЗОВ успевали метаболизироваться аэробной

микробиотой; использовать химические фильтры и биофильтры для очистки воздуха от ЗОВ; ограждать территории ферм живыми изгородями из деревьев для рассеивания (дисперсии) запахов [23, 24]. Стратегия контроля запаха выбирается в зависимости от того, что является его источником (помещения для содержания животных, места хранения ППЖ или объекты землепользования), а также насколько эффективной будет та или иная технология в условиях конкретного хозяйства, каково соотношение затрат и получаемой экономической выгоды от внедрения технологии контроля ЗЗ в практику [25].

Обработка ППЖ дезодорирующими добавками

Снижение эмиссии ЗОВ может быть достигнуто за счёт обработки НС химическими реагентами, ферментами и/или сорбентами, способными подавлять гнилостную микробиоту или устранять НЗ за счёт разрушения, связывания или маскировки ЗОВ. Перечень реагентов и материалов, которые можно использовать для обработки ППЖ, ограничивается следующими требованиями: экологическая безопасность, безвредность для здоровья людей и животных, экономичность, низкие нормы расхода. Соответствующие требования существенно ограничивают возможности выбора дезодорирующих добавок.

К преимуществам обработки реагентами можно отнести быстрое достижение необходимого эффекта. К недостаткам – дополнительное загрязнение ОС химическими веществами и продуктами реакции, высокие затраты на приобретение реактивов, относительную кратковременность достигаемого эффекта, обусловленную быстрым восстановлением гнилостной микробиоты в богатой питательными веществами среде [26]. Несмотря на указанные недостатки, интерес к поиску дезодорирующих материалов не исчезает. Химические добавки могут оказывать непосредственное или опосредованное воздействие на эмиссию ЗОВ. Непосредственное воздействие обусловлено химической деструкцией ЗОВ или связыванием ЛС в нелетучие соединения. Опосредованное воздействие реализуется за счёт регулирования численности и состава населяющей НС микробиоты. Следует отметить, что практически все химические реагенты, используемые для обработки НС, оказывают влияние как на состояние микробиоты, так и содержание в субстрате ЗОВ [27–29].

Значительное снижение эмиссии ЗОВ наблюдается при обработке НС реагентами подкисляющего или подщелачивающего действия. Смещение рН в неблагоприятную для гнилостной микробиоты область приводит к замедлению процессов деструкции органических веществ, в результате чего органолептические характеристики ППЖ улучшаются. Экспериментально установлено, что подкисление НС до $\text{pH} \leq 5,5$ способствует уменьшению выбросов одорантов и парниковых газов, в частности выбросы NH_3 снижаются на 75–83% [30]. Для подкисления ППЖ могут быть использованы органические или минеральные кислоты. Первый вариант сопряжён с меньшими рисками для ОС, животных и персонала, однако является весьма затратным. Более бюджетный вариант ориентирован на применение минеральных кислот, в частности H_2SO_4 (дешёвая, нелетучая, сильная) [31–33]. В исследованиях [34] установлено, что орошение свиного навоза раствором H_2SO_4 (0,2 моль/л) с помощью дождевальной системы позволяет снизить выбросы NH_3 на 60,8%, интенсивность запаха – на 41,8%. Обработка навоза КРС серной кислотой приводит к сокращению выбросов NH_3 , CH_4 и CO_2 на 61%, 98% и 15% соответственно, причём подкисление обеспечивает более выраженный эффект дезодорации, чем внесение в навоз сорбента – биоугля [35]. Основным недостатком H_2SO_4 , как реагента для обработки ППЖ, является высокая химическая агрессивность, что существенно сдерживает внедрение технологии подкисления в практику животноводства.

Из реагентов подщелачивающего действия практический интерес может представлять известь или известковое молоко. Известь является недорогим, безопасным и эффективным реагентом, позволяющим повысить рН до 12 и более, что приводит к инактивации микроорганизмов (МО), связыванию H_2S и ЛЖК в нелетучие соли и уменьшению запаха [36–38].

Регулирование рН оказывает влияние не только на микробиоту, но и на химические процессы, протекающие в НС. Так, снижение рН приводит к уменьшению эмиссии NH_3 за счёт перевода этого газа в нелетучую аммонийную форму NH_4^+ , однако параллельно активизируется разложение нелетучих сульфидов и солей органических кислот с выделением в атмосферу малорастворимого H_2S и ЛЖК [39]. При подщелачивании среды направление процессов изменяется на противоположное – ЛЖК и H_2S образуют нелетучие соли, а ион NH_4^+ разрушается с выделением

газообразного NH_3 . Поддержание pH в интервале 6,0–7,5 задерживает образование газообразных NH_3 и H_2S [40], вместе с тем соответствующая область pH является весьма благоприятной для жизнедеятельности большинства МО, разлагающих органические соединения с выделением ЗОВ [41].

Кроме регуляторов pH для обработки ППЖ могут быть использованы реагенты окислительного действия (O_3 , Cl_2 , NaOCl , CaOCl_2 , хлорная известь, H_2O_2 , CaO_2 и др.). Реагенты-окислители характеризуются выраженными бактерицидными свойствами и способностью разрушать многие ЗОВ до не имеющих запаха соединений [42–44]. К недостаткам соответствующих реагентов следует отнести значительную стоимость и высокий расход, в результате чего обработка НС окислителями с целью снижения запаха чаще всего оказывается нерентабельной. Кроме того, такие эффективные окислители, как O_3 и Cl_2 , являются весьма токсичными, а использование их в условиях животноводческих предприятий сопряжено с высокими рисками для персонала и животных.

Наиболее экологичным и достаточно эффективным окислителем является кислород воздуха. Для насыщения НС кислородом используют специальные установки – аэраторы. В среде с высоким содержанием O_2 активизируется деятельность аэробной микробиоты, окисляющей сложные органические соединения до таких продуктов, как CO_2 и H_2O . Сера и азот, входящие в состав органических компонентов навоза, частично ассимилируются микробиотой или окисляются до не имеющих запаха соединений, в результате эмиссия ЗОВ снижается [45–47]. Особенно эффективно в процессе аэрации окисляются ЛЖК [48]. Аэрацию НС в лагунах можно осуществлять в непрерывном или прерывистом режиме, причём обогащать кислородом можно только поверхностный слой (на глубину 80–400 мм). Наиболее эффективному снижению запаха способствует поддержание концентрации растворённого O_2 в поверхностном слое на уровне от 0,5 до 2,5 мг/л [49]. В исследованиях [50] установлено, что при аэрации НС с содержанием сухих веществ от 0,5 до 4,0% в течение 0,5; 2,0 и 4,0 суток при скорости воздушного потока $1,2 \text{ л}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ удаление ЛЖК составляет от 46,6 до 78,5; от 49,4 до 86,9 и от 48,8 до 95,6% соответственно. Основным недостатком технологии аэрации – высокие инвестиционные и эксплуатационные затраты на аэраторные установки [51].

Одновременное использование различных реагентов позволяет усилить дезодорирующий эффект. В исследованиях [52] показано, что состав, включающий персульфат аммония, надуксусную кислоту и формалин, а также композиция, содержащая молибдат аммония и нитрит натрия, способны обеспечить достаточно долговременное устранение запаха НС.

В ряде исследований обоснована возможность снижения запаха ППЖ за счёт ферментных препаратов, в частности, пероксидаз в сочетании с H_2O_2 или CaO_2 (использование CaO_2 даёт более выраженный результат) [26, 53–54]. Несомненным достоинством соответствующего направления дезодорации является экологическая безопасность. Принцип, лежащий в основе метода, заключается в окислении одорантов согласованным действием пероксидаз и пероксидов, служащих акцепторами электронов. Результаты лабораторных исследований показали, что обработка свиного навоза композицией «пероксидаза+пероксид» позволяет снизить интенсивность запаха на 40–60% при сохранении эффекта дезодорации до 72 часов [55]. В работе [56] приведены результаты испытания соответствующего метода в условиях свиноводческой фермы. В качестве реагентов применяли комбинацию соевой лузги (источник пероксидаз) и CaO_2 . Свиной навоз обрабатывали реагентами поверхностно и однократно в начале 42-дневного эксперимента, норма внесения – $2,28 \text{ кг}/\text{м}^2$ с добавлением 4,2% масс. CaO_2 . Достоверное снижение газообразных выбросов из обработанного навоза по сравнению с контролем наблюдалось по NH_3 (21,7%), H_2S (79,7%), n-масляной кислоте (37,2%), валериановой кислоте (47,7%), изовалериановой кислоте (39,3%), индолу (31,2%), скатолу (43,5%). При этом выбросы диметилдисульфида и метантиола возросли на 30,6%. Общая стоимость обработки (материал + труд) составила 2,62 доллара США на каждую реализуемую свинью.

Ориентация сельского хозяйства на внедрение зелёных технологий усилила интерес к поиску натуральных экологически безопасных дезодорирующих материалов. К таким материалам относят растительные экстракты. Показано [57], что распыление на поверхность навоза экстрактов растений, содержащих эфирные масла кокоса, лимона и чайного дерева, позволяет снизить концентрацию ЗОВ почти на 50%. Дезодорирующее действие экстрактов может быть усилено за

счёт специально подобранных культур МО. Так, совместная обработка птичьего помёта микробиологическим препаратом и экстрактом юкки Шидигера *Yucca schidigera* приводит к снижению концентрации ЗОВ на 58–73% [58]. Добавки тимола и карвакрола (фенольные соединения растительного происхождения) в дозе 2 г/кг свиного навоза снижают численность МО, разлагающих органические вещества и уменьшают эмиссию ЗОВ [59].

Весьма спорным направлением борьбы с НЗ считается технология маскировки НЗ ароматизаторами. Маскировка возникает в том случае, если одорант большей концентрации и интенсивности подавляет ощущение запаха другого одоранта. Технология маскировки не решает проблему ЗЗ, однако снижает уровень неудовлетворённости населения качеством воздуха. Обычно в состав отдушек включают летучие альдегиды с фруктово-травянистым запахом, сложные эфиры, имеющие сладкий фруктово-цветочный аромат, некоторые терпены (пинен – запах сосны, лимонен – запах лимона) [60]. Было показано, что распыление ароматизаторов и эфирного масла уменьшает интенсивность НЗ до 60–80%, при этом эфирные масла оказывают не только маскирующее, но и кратковременное бактерицидное воздействие на источники запаха [61]. Эффект обработки сохраняется до 3 часов. Распыление воды с добавкой эфирных масел помогает скрыть запах органических аминов, меркаптанов и дисульфидов [62]. Следует отметить, что одноразовое применение различных химических реагентов обеспечивает весьма кратковременный эффект снижения НЗ. Для достижения стабильного долгосрочного результата обработку ППЖ реагентами необходимо повторять с определённой периодичностью [8].

Перспективы применения сорбентов

Сорбирующие материалы используют как для обработки ППЖ, так и для очистки газовых выбросов на источниках ЗОВ. Соответствующие технологии не требуют значительных капиталовложений и эксплуатационных затрат, однако приводят к дополнительным проблемам, связанным с необходимостью регенерации или утилизации отработанных сорбентов. Для практического использования в сельском хозяйстве наиболее пригодны сорбирующие материалы, которые можно утилизировать в качестве почвенных мелиорантов или удобрений. Так, для удаления NH_3

из вентиляционных выбросов животноводческих и птицеводческих предприятий в ряде европейских стран (Дания, Нидерланды, Германия) успешно используются одноступенчатые мокрые кислотные скрубберы, в которых абсорбентом служит раствор кислоты. Эффективность поглощения NH_3 в соответствующих установках достигает 40–100%, при этом запах снижается от 3 до 51% (в среднем – 27%) [63]. В аналогичных исследованиях других авторов снижение НЗ отработанного воздуха после обработки в кислотном скруббере составило 16% [64]. К достоинствам кислотных скрубберов можно отнести возможность использования отработанных реагентов в качестве аммонийных азотных удобрений, что делает процесс очистки безотходным [65].

Эффективную очистку газообразных выбросов от широкого спектра ЗОВ обеспечивают сорбенты на основе продуктов пиролиза биомассы и/или органических отходов, получивших название биоуголь или биочар [66]. Несомненными преимуществами биоуглей являются химическая инертность, экологическая безопасность, положительное влияние на свойства почвы. Соответствующий материал, благодаря высокой пористости, значительной удельной поверхности и большому количеству поверхностных функциональных групп, может стать перспективным средством для борьбы с НЗ [67]. Пористая структура и гидрофобные свойства позволяют использовать некоторые разновидности (марки) биоуглей для изготовления плавающих покрытий для лагун. Соответствующие покрытия существенно снижают объёмы эмиссии ЗОВ и других газообразных веществ в атмосферный воздух [68]. Переработка навоза в биоуголь с последующим его использованием в качестве сорбента ЗОВ является хорошим примером циклической экономики, позволяющей минимизировать экологические издержки за счёт увеличения циклов полезного использования материалов.

Кроме угольных сорбентов для очистки воздуха и снижения НЗ внутри животноводческих помещений могут найти применение алюмосиликатные сорбирующие материалы (галлуазит, бентонит, вермикулит и др). Соответствующие сорбенты способны удалять NH_3 и некоторые другие ЛС, выделяемые из птичьего помёта. Согласно экспериментальным данным, наибольшую эффективность проявляют фильтры на основе активированного галлуазита и обожжённого бентонита, поглощающие более 80% ЗОВ [69, 70].

Микробиологические технологии контроля запаха

Технологии, базирующиеся на применении разнообразных непатогенных МО и специально подобранных консорциумов МО, способных метаболизировать ЗОВ, привлекают особое внимание исследователей. Соответствующее направление борьбы с ЗЗ считается наиболее актуальным в связи с ориентацией на внедрение зелёных технологий в практику сельского хозяйства. Процессы микробиологической деградации органических веществ, как правило, носят окислительный характер, а конечные продукты – CO_2 , H_2O , нитраты, сульфаты, фосфаты не представляют экологической опасности. Снижение эмиссии ЗОВ за счёт МО-процессов реализуется в биогазовых установках, биофильтрах, биоскрубберах, а также с помощью микробной инокуляции ППЖ специальными штаммами микроорганизмов-деструкторов. Инокуляция не требует сложного оборудования и может быть использована как в помещениях для содержания животных, так и в местах хранения и обработки НС. Для инокуляции чаще всего применяют специально подобранные штаммы бактерий родов *Bacillus* (*B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. licheniformis*), *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. acidophilus*, *L. argentoratenensis*), некоторые виды *Pseudomonas* (*P. fluorescens*, *Pseudomonas sp.*), *Leuconostoc mesenteroides*, *Enterococcus faecium*, *Streptomyces* (*S. rutgersensis*, *S. plantarum*), а также грибы *Saccharomyces cerevisiae* и *Candida* (*C. tripicalis*, *C. rugosa*, *C. maris*, *C. inconspicua*, *C. glycerinogenes*).

Большинство МО способно удалять из продуктов разложения ограниченное количество компонентов запаха. Относительно высокую скорость деградации NH_3 и H_2S могут обеспечить определённые штаммы *B. licheniformis*, однако эти МО медленно метаболизуют ЛОС. Активно поглощать ЛОС способны *S. cerevisiae* [71]. Снизить эмиссию ЛЖК можно за счёт обработки навоза специально подобранными штаммами дрожжей *Candida maris* и *C. rugosa* [72]. Способность разлагать диметилдисульфид характерна для *Schizophyllum commune* [73]. Устойчивый к биодеградации скатол успешно метаболизуют некоторые штаммы *Rhodococcus* [74]. Штаммы *Bacillus subtilis subsp. spizizenii*, *L. mesenteroides*, *C. inconspicua* и *P. faecalis* способны удалять выделяющиеся из птичьего помёта NH_3 , H_2S , диметиламин, триметил-

амин, изомасляную кислоту [75]. *Pichia kudriavzevii*, *Paracoccus denitrificans* и *Bacillus subtilis* проявляют выраженную способностью метаболизировать NH_3 и H_2S и снижать запах свиного навоза [76]. Аналогичный результат обеспечивает инокуляция навоза специально выделенным штаммом *Lactobacillus* (за 36 дней обработки эмиссия NH_3 и H_2S снижается более чем на 30%, ЛОС – на 40%) [77].

Для поглощения широкого спектра ЗОВ используют консорциумы различных МО, способных к совместному существованию в определённых условиях [78, 79]. В работе [80] приведён пример успешного использования комбинации *Serratia marcescens* и *Bacillus cereus* для биодеструкции масляной кислоты. Эффективный микробиологический препарат для дезодорации птичьего помёта на основе *P. fluorescens*, *E. faecium*, *B. subtilis*, *B. megaterium*, *Leuconostoc mesenteroides*, *L. plantarum* и перлит-бентонитового сорбента-носителя был разработан и описан в работе [81]. Соответствующий препарат, нанесённый на птичий помёт, оказался особенно активным в отношении NH_3 и H_2S , содержание которых в вытяжном воздухе после 2 суток дезодорации снизилось на 94% и 60% соответственно.

Консорциумы МО-биодеструкторов широко используются в таких инженерных сооружениях, как биофильтры (БФ), биоскрубберы (БС), биогазовые установки (БГУ). Биофильтры представляют собой биореакторы, содержащие пористый материал (загрузку) на котором иммобилизована аэробная микробиота, окисляющая ЗВ (в том числе ЗОВ) до безвредных продуктов. Биофильтрационные установки пригодны для обработки больших объёмов одорантов низкой концентрации и могут быть использованы для уменьшения выбросов ЗОВ из животноводческих помещений и мест хранения навоза [82]. Современные управляемые БФ позволяют поглотить до 95% H_2S и до 80% NH_3 [83]. Степень снижения H_2S за счёт БФ может превышать 80% [84, 85]. На эффективность работы БФ большое влияние оказывает температура и степень насыщения раствора кислородом [86]. Поддержание соответствующих параметров на оптимальном уровне требует существенных материальных затрат.

Биоскрубберы представляют собой трёх-фазные биореакторные системы с псевдооживленным слоем. Процесс очистки включает физическое разделение или абсорбцию ЗОВ в водной фазе в абсорбционной колонне и последующую биологическую очистку в жид-

кофазном биореакторе. Обычно биореактор представляет собой аэрируемый резервуар, содержащий взвешенный активный ил [87–89]. Водная фаза циркулирует в БС по замкнутому контуру (скруббер – биореактор), что предотвращает образование производственного стока. Основными преимуществами БС являются эксплуатационная стабильность, возможность эффективного контроля рабочих параметров раствора (рН, дозировка питательных веществ), компактность, пригодность для работы с большими скоростями потока газа и высокими концентрациями ЗВ. Применение БС позволяет весьма эффективно удалять различные виды биогенных ЗОВ [90]. Основным недостатком, сдерживающим внедрение БФ и БС в практику сельского хозяйства для поглощения ЗОВ, являются высокие эксплуатационные затраты [91].

Если в БФ и БС процесс деструкции ЗОВ происходит в аэробных условиях, то в БГУ реализуется анаэробное метановое брожение, позволяющее получать целевой продукт – биогаз, содержащий до 70% CH_4 . Уровень запаха ППЖ после сбраживания обычно снижается [92, 93]. С точки зрения экологии, переработка ППЖ в биогаз весьма привлекательна, однако строительство и эксплуатация БГУ требует высоких затрат, при этом срок окупаемости достигает 5–9 лет [94]. В условиях РФ рентабельность БГУ дополнительно снижается за счёт необходимости подогрева биореактора в холодный период года [95]. Кроме низкой рентабельности, сами БГУ могут выступать источниками ЗЗ [96], что обусловлено особенностями сбраживаемого субстрата. Согласно экспериментальным данным, переработка сырья с высоким содержанием навоза в БГУ приводит к усилению эмиссии ЗОВ [97], в частности H_2S и других соединений серы, удаление которых из биогаза сопряжено с дополнительными затратами [98]. Источником НЗ может выступать не только биогаз, но и сброженный жидкий остаток (эффлюент).

Для снижения НЗ эффлюента может быть использован метод электрохимического окисления растворённых ЗОВ [99] или технология медленной песчаной фильтрации (МПФ) [100]. Соответствующая технология объединяет физические, химические и биологические процессы удаления ЗВ. Системы МПФ, функционирующие как биореакторы с фиксированной средой, устойчивы к изменениям рН, концентрации поверхностно-активных веществ или тяжёлых металлов. Основными компонентами песчаных фильтров являются:

слой надосадочной воды, песчаная подушка (мелкий и крупный песок), гравий и выпускной шланг. Надосадочный слой обеспечивает напор, достаточный для прохождения воды через фильтрующую загрузку с периодом удерживания в течение нескольких часов. Гравий поддерживает песчаный слой, обеспечивает беспрепятственный проход очищенной воды из фильтрующего слоя и предотвращает засорение песком поддренажных труб. Основная очистка происходит в верхней части песчаного слоя, где формируется плотная биоплёнка [101]. К достоинствам МПФ можно отнести невысокие затраты, экономичность, эффективность, экологическую безопасность. Основным недостатком метода – низкая производительность, чувствительность к температурному фактору и необходимость предварительного удаления взвешенных частиц из очищаемых стоков, что ограничивает возможность внедрения соответствующей технологии на крупных животноводческих предприятиях [102–104].

Рассеивание (дисперсия) запахов

Ощущение запаха возникает в том случае, когда концентрация одоранта в атмосферном воздухе достигает порога восприятия. Создание условий для эффективного рассеивания ЗОВ способствует снижению концентрации одорантов и улучшению качества воздушной среды. Для рассеивания ЗОВ от животноводческих предприятий широко используются защитные лесные насаждения (ветрозащитные полосы, растительные экологические буферы). Ветрозащитные полосы (ВП) обеспечивают визуальную изоляцию источников запаха, активно улавливают пыль, рассеивают и частично поглощают ЗОВ, улучшают экологическую обстановку на территории размещения животноводческих предприятий [22, 105, 106]. Поскольку источники запаха (лагуны, компостные площадки, одноэтажные помещения для животных) находятся вблизи поверхности почвы, а шлейф запаха имеет тенденцию распространяться в приповерхностном слое воздуха, ВП даже небольшой высоты (6–12 м) могут быть эффективными для перехвата, разрушения и разбавления шлейфа. Достижимый результат существенно зависит от видового состава растений, а также высоты, пористости и ориентации ВП по отношению к источнику запаха и розе ветров [107]. Согласно опубликованным данным, ВП с оптической пористостью 35% снижают дистанцию максимального распространения

запаха на 21–40% по сравнению с участком без ВП. Оптимальный эффект достигается при использовании ВП, расположенной на расстоянии 15 м по ветру от источника запаха [108]. Известно, что хорошими носителями ЗОВ являются пылевидные частицы. Интенсивному поглощению пыли и снижению ЗЗ способствует включение в состав ВП хвойных, а также лиственных пород деревьев с шероховатой листвой. Деревья и кустарники с гладкими кожистыми листьями удерживают пыль и рассеивают запах значительно хуже [109].

Оптимизация рациона животных

Технологии оптимизации рационов (ОР) направлены на обеспечение максимально сбалансированного содержания питательных веществ в кормах, улучшение конверсии корма в процессе пищеварения, связывание образующихся ЗОВ с помощью сорбентов. Среди основных направлений ОР выделяют уменьшение количества сырого протеина (СП) [110]; частичную замену СП дефицитными аминокислотами (АК) [111]; активизацию пищеварения за счёт кормовых ферментов (целлюлазы, α -амилазы, фитазы) [112]; обогащение рационов пробиотическими препаратами, содержащими важные для нормального пищеварения штаммы бактерий (*Bacillus*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Rumenococcus*) [113], включение в рацион натуральных адсорбентов, способных поглощать ЗОВ (бентонит, цеолит, каолинит и др.) [114].

Согласно опубликованным данным, уменьшение СП в рационах с 18 до 12% способствует снижению эмиссии метилсульфида, дисульфида углерода, этантиола, фенола, 4-этилфенола, индола и 3-метилиндола, при этом выбросы NH_3 снижаются на 53%, запах – на 80% [10]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что уменьшение СП в рационах свиней весом 70 кг до 130 г/кг массы тела позволяет снизить эмиссию NH_3 на 62,4%. Максимальный уровень выбросов NH_3 наблюдается для рационов с содержанием СП 220 г/кг; наиболее сильный запах соответствовал количеству СП 190 г/кг [115]. Избыток белка в рационах сельскохозяйственных животных обусловлен необходимостью восполнения дефицита незаменимых АК (L-метионин, L-лизин и L-триптофан), характерного для натуральных кормов [111]. Включение в рацион АК, с одной стороны, позволяет снизить долю СП, но с другой, сами АК становятся дополнительными источниками ЗОВ. Так, важ-

нейший компонент фекального запаха скатол является метаболитом триптофана [116].

На интенсивность запаха влияет калорийность корма. Согласно данным [117], минимальная калорийность питания (3907 ккал/кг) сопровождалась максимальной интенсивностью запаха навоза.

Заключение

Обзор научных публикаций показывает, что, несмотря на интенсивные исследования в сфере разработки технологий ограничения эмиссии ЗОВ, проблема устранения запаха, связанного с функционированием животноводческих предприятий, до настоящего времени остаётся не решённой. Сложность проблемы обусловлена значительными объёмами образования ППЖ и чрезвычайным разнообразием компонентного состава ЗОВ. Пригодные для внедрения в практику технологии должны соответствовать следующим критериям: эффективность, экологическая безопасность, экономичность, высокая производительность. Ни один из описанных методов контроля ЗЗ не отвечает всем критериям одновременно. Внедрение высокопроизводительных, эффективных и экологически безопасных технологий (анаэробное сбраживание, аэрация, биофильтрация) требует значительных инвестиционных и эксплуатационных затрат, что повышает себестоимость и снижает конкурентоспособность продукции, а относительно низкочастотные технологии (применение химических реагентов, сорбентов, ароматизаторов) не позволяют получить гарантированный результат устранения НЗ.

Улучшению качества атмосферного воздуха на территориях размещения животноводческих комплексов способствует комплексный подход, сочетающий гигиенические мероприятия (регулярную уборку и дезинфекцию мест содержания животных); современные технологии обработки ППЖ (анаэробное сбраживание, аэрацию жидкой фракции, регулирование рН, обработку НС биопрепаратами, удаление ЗОВ из выбросов с помощью фильтров и/или скрубберов); оптимизацию рационов (снижение содержания доли азота и серы в кормах до физиологически обоснованных норм; включение в рацион энтеросорбентов, пребиотиков и пробиотиков); обустройство защитных лесных полос для улавливания пыли и дисперсии ЗОВ с учётом климата, рельефа местности, розы ветров, специфики источников выбросов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ №122040100032-5.

References

1. Wang Y.C., Han M.F., Jia T.P., Hu X.R., Zhu H.Q., Tong Z., Lin Y.T., Wang C., Liu D.Z., Peng Y.Z., Wang G., Meng J., Zhai Z.X., Zhang Y., Deng J.G., Hsi H.C. Emissions, measurement, and control of odor in livestock farms: A review // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 776. Article No. 145735. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145735
2. Brancher M., Griffiths K.D., Franco D., de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world // *Chemosphere.* 2017. V. 168. P. 1531–1570. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.160
3. Decree of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 2398 “On approval of criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV” (amended 7.10.2024) [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/57329285> (Accessed: 31.10.2023) (in Russian).
4. Kuzmina T.N., Svinarev I.Yu., Tretyakova O.L. ITS 41-2017 “Intensive pig breeding”: updating’s directions // *Machinery and technologies in livestock.* 2023. No. 1 (49). P. 47–53 (in Russian). doi: 10.22314/27132064-2023-1-47
5. Schiffman S.S., Williams C.M. Science of odor as a potential health issue // *J. Environ. Qual.* 2005. V. 34. No. 1. P. 129–138. doi: 10.2134/jeq2005.0129a
6. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Control of odor pollution of atmospheric air (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 26–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034
7. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P. Safety assessment of regenerated litter obtained at the filtration and drying plant // *Russian Journal of Applied Ecology.* 2023. No. (33). P. 45–51 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.45.51
8. 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
9. Pilip L.V., Syrchina N.V. The importance of microorganisms-ammonifiers of manure effluents in the emission of ammonia // *KSTU News.* 2023. No. 68. P. 46–54 (in Russian). doi: 10.46845/1997-3071-2023-68-46-54
10. Le P.D., Aarnink A.J., Ogink N.W., Becker P.M., Verstegen M.W. Odour from animal production facilities: its relationship to diet // *Nutr. Res. Rev.* 2005. V. 18. No. 1. P. 3–30. doi: 10.1079/NRR200592
11. Aizawa A., Miyazaki A., Tanaka N. Emissions of volatile organic compounds from dairy cattle manure in a cattle shed in Japan // *Asian J. Atmospheric Environ.* 2022. V. 16. No. 3. P. 122–134. doi: 10.5572/ajae.2022.024
12. Woodbury B.L., Gilley J.E., Parker D.B., Marx D.B. Emission of volatile organic compounds from land-applied beef cattle manure as affected by application method, diet, and soil water condition // *J. ASABE.* 2022. V. 65. No. 1. P. 123–133. doi: 10.13031/ja.14587
13. Marszałek M., Kowalski Z., Makara A. Emission of greenhouse gases and odorants from pig slurry – effect on the environment and methods of its reduction // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2018. V. 25. No. 3. P. 383–394. doi: 10.1515/eces-2018-0026
14. Hanajima D., Kuroda K., Morishita K., Fujita J., Maeda K., Morioka R. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting // *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. No. 7. P. 2306–2310. doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.026
15. Ni J.Q., Robarge W.P., Xiao C., Heber A.J. Volatile organic compounds at swine facilities: a critical review // *Chemosphere.* 2012. V. 89. No. 7. P. 769–788. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.04.061
16. Liu Z., Powers W., Mukhtar S. A review of practices and technologies for odor control in swine production facilities // *Appl. Eng. Agric.* 2014. V. 30. No. 3. P. 477–492. doi: 10.13031/aea.30.10493
17. 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
18. Dunlop M., Ristovski Z.D., Gallagher E., Parsci G., Modini R.L., Agranovski V., Stuetz R.M. Odour, dust and non-methane volatile organic-compound emissions from tunnel-ventilated layer-chicken sheds: a case study of two farms // *Anim. Prod. Sci.* 2013. V. 53. No. 12. P. 1309–1318. doi:10.1071/AN12343
19. Teuchezh A.A. The technology of accelerated processing of non-pigmented pig manure in organic fertilizer // *Proceedings of the Kuban State Agrarian University.* 2017. No. 65. P. 157–165 (in Russian). doi: 10.21515/1999-1703-65-157-165
20. Haga K. Sustainable recycling of livestock wastes by composting and environmentally friendly control of wastewater and odors // *J. Environ. Sci. Eng. B.* 2021. V. 10. No. 5. P. 163–178. doi: 10.17265/2162-5263/2021.05.001
21. Zicari G., Soardo V., Rivetti D., Cerrato E., Russo D. Livestock farming and atmospheric emissions // *Ig. Sanità Pubbl.* 2013. V. 69. No. 4. P. 445–457.
22. Patterson P.H., Adrizal. Management strategies to reduce air emissions: Emphasis–dust and ammonia // *J. Appl. Poult. Res.* 2005. V. 14. No. 3. P. 638–650. doi: 10.1093/japr/14.3.638
23. Hamilton D.W., Ogejo J.A. Strategies to control farmstead odors // *Oklahoma State University Extension.* 2017. Article No. BAE-2905. [Internet resource] <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/strategies-to-control-farmstead-odors.html> (Accessed: 31.05.2024).

24. Cao T., Zheng Y., Dong H. Control of odor emissions from livestock farms: A review // *Environ. Res.* 2023. V. 225. Article No. 115545. doi: 10.1016/j.envres.2023.115545
25. Karmakar S., Laguë C., Agnew J., Landry H. Integrated decision support system (DSS) for manure management: A review and perspective // *Comput. Electron. Agric.* 2007. V. 57. No. 2. P. 190–201. doi: 10.1016/j.compag.2007.03.006
26. Ye F.X., Zhu R.F., Li Y. Deodorization of swine manure slurry using horseradish peroxidase and peroxides // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 167. No. 1–3. P. 148–153. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.096
27. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Rutman V.V. Influence of various types of surfactants on gas emissions and microbiota of the liquid fraction of manure effluents // *Theoretical and Applied Ecology.* 2023. No. 3. P. 59–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-059-072
28. Syrchina N.V., Pilip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effect of various processing methods on the numbers of *Clostridium* (Clostridia, Bacteria) in animal by-products // *Povolzhskiy Journal of Ecology.* 2023. No. 4. P. 466–480 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-4-466-480
29. 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
30. Fuchs A., Dalby F.R., Liu D., Kai P., Feilberg A. Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid // *Cleaner Eng. Technol.* 2021. V. 4. Article No. 100263. doi: 10.1016/j.clet.2021.100263
31. Jensen A.Ø. Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid // *Trans. ASAE.* 2002. V. 45. No. 1. P. 223–227. doi: 10.13031/2013.7874
32. 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
33. 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. 4. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-143-148
34. Wang K., Wei B., Huang D., Li H., Ye Z. A case study of effects of sulfuric acid spray on ammonia and odor emissions from swine manure composting // *Appl. Eng. Agric.* 2014. V. 30. No. 2. P. 267–276. doi: 10.13031/aea.30.10129
35. Miranda C., Soares A.S., Coelho A.C., Trindade H., Teixeira C.A. Environmental implications of stored cattle slurry treatment with sulphuric acid and biochar: A life cycle assessment approach // *Environ. Res.* 2021. V. 194. Article No. 110640. doi: 10.1016/j.envres.2020.110640
36. Makara A., Kowalski Z., Sówka I. Possibility to eliminate emission of odor from pig manure treated using AMAK filtration method // *Desalination Water Treat.* 2016. V. 57. No. 3. P. 1543–1551. doi: 10.1080/19443994.2014.1002274
37. 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
38. Krach K.R., Burns B.R., Li B., Shuler A., Cole C., Xie Y. Odor control for land application of lime stabilized biosolids // *Water Air Soil Pollut.: Focus.* 2008. V. 8. P. 369–378. doi: 10.1007/s11267-007-9147-5
39. Syrchina N.V., Pilip L.V. The effect of acidification on the sulfide hydrogen emissions in the organic waste of pig farms // *Regional Environmental Issues.* 2021. No. 4. P. 102–106 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
40. Zhang X.L., Yan S., Tyagi R.D., Surampalli R.Y. Odor control in lagoons // *J. Environ. Manage.* 2013. V. 124. P. 62–71. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.022
41. Ayupova A.Zh., Khasenova E.Zh., Sembakova D.Zh., Moldagulova N.B., Sarsenova A.S., Duambekov M.S. Optimization of cultivation conditions of effective microorganisms for fermentation of organic animal wastes // *Herald of Science and Education.* 2019. No. 13–1. V. 67. P. 58–61 (in Russian).
42. Alkoalk F.N. Ozone treatment of animal manure for odor control // *American Journal of Environmental Sciences.* 2009. V. 5. No. 6. P. 765–771. doi: 10.3844/ajessp.2009.765.771
43. Więckol-Ryk A., Thomas M., Białecka B. Improving the properties of degraded soils from industrial areas by using livestock waste with calcium peroxide as a green oxidizer // *Materials.* 2021. V. 14. No. 11. Article No. 3132. doi: 10.3390/ma14113132
44. Syrchina N.V., Pilip 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
45. Zeng Y., De Guardia A., Ziebal C., De Macedo F.J., Dabert P. Nitrification and microbiological evolution during aerobic treatment of municipal solid wastes // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 110. P. 144–152. doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.135
46. Xia Y., Lü C., Hou N., Xin Y., Liu J., Liu H., Xun L. Sulfide production and oxidation by heterotrophic bacteria under aerobic conditions // *ISME J.* 2017. V. 11. No. 12. P. 2754–2766. doi: 10.1038/ismej.2017.125
47. Jia T., Zhang L., Zhao Q., Peng Y. The effect of biofilm growth on the sulfur oxidation pathway and the synergy of microorganisms in desulfurization reactors under

- different pH conditions // *J. Hazard. Mater.* 2022. V. 432. Article No. 128638. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128638
48. Halder J.N., Lee M.G. A review on techniques to control and mitigate odors in swine facilities // *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences.* 2020. V. 32. No. 3. P. 297–310. doi: 10.22698/jales.20200024
49. Rahman S., Borhan M.S. Typical odor mitigation technologies for swine production facilities – A review // *J. Civil Environ. Eng.* 2012. V. 2. No. 4. Article No. 117. doi: 10.4172/2165-784X.1000117
50. Zhang Z.J., Zhu J. Effectiveness of short-term aeration in treating swine finishing manure to reduce odour generation potential // *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2005. V. 105. No. 1–2. P. 115–125. doi: 10.1016/j.agee.2004.05.006
51. Janzekovic M., Mursec B., Cus F., Ploj T., Janzekovic I., Zuperl U. Use of machines for liquid manure aerating and mixing // *J. Mater. Process. Technol.* 2005. V. 162–163. P. 744–750. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.215
52. Ratko A.A., Duko Yu.V., Shevchuk V.V. Study of effect of pig manure treatment method on emission of odor-forming substances // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series.* 2022. V. 60. No. 2. P. 234–242 (in Russian). doi: 10.29235/1817-7204-2022-60-2-234-242
53. Govere E.M., Tonegawa M., Bruns M.A., Wheeler E.F., Heinemann P.H., Kephart K.B., Dec J. Deodorization of swine manure using minced horseradish roots and peroxides // *J. Agric. Food Chem.* 2005. V. 53. No. 12. P. 4880–4889. doi: 10.1021/jf0404290
54. Parker D.B., Cai L., Kim K.H., Hales K.E., Spiels M.J., Woodbury B.L., Atkin A.L., Nickerson K.W., Patefield K.D. Reducing odorous VOC emissions from swine manure using soybean peroxidase and peroxides // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 124. P. 95–104. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.031
55. Yan Z., Wei X., Yuan Y., Li Z., Li D., Liu X., Gao L. Deodorization of pig manure using lignin peroxidase with different electron acceptors // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2016. V. 66. No. 4. P. 420–428. doi: 10.1080/10962247.2016.1144660
56. Maurer D.L., Koziel J.A., Bruning K., Parker D.B. Farm-scale testing of soybean peroxidase and calcium peroxide for surficial swine manure treatment and mitigation of odorous VOCs, ammonia and hydrogen sulfide emissions // *Atmos. Environ.* 2017. V. 166. P. 467–478. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.07.048
57. Wu J., Yang J., Wang J., Fang L., Fang J. A field-scale evaluation of the removal of odorous gases by a plant material-based deodorant // *Front. Environ. Sci.* 2023. V. 10. Article No. 1073835. doi: 10.3389/fenvs.2022.1073835
58. Matusiak K., Oleksy M., Borowski S., Nowak A., Korczyński M., Dobrzański Z., Gutarowska B. The use of *Yucca schidigera* and microbial preparation for poultry manure deodorization and hygienization // *J. Environ. Manage.* 2016. V. 170. P. 50–59. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.007
59. Varel V.H. Livestock manure odor abatement with plant-derived oils and nitrogen conservation with urease inhibitors: A review // *J. Anim. Sci.* 2002. V. 80. No. E-suppl_2. P. E1–E7. doi: 10.2527/animalsci2002.80E-Suppl_2E1x
60. Suffet I.H., Decottignies V., Zhou Y., Bian Y., Vitko T.G. An evaluation of masking nuisance odors from a source by chemical and sensory analyses // *Water Environ. Res.* 2023. V. 95. No. 7. Article No. e10901. doi: 10.1002/wer.10901
61. Kim K.Y., Ko H.J., Kim H.T., Kim Y.S., Roh Y.M., Lee C.M., Kim C.N. Odor reduction rate in the confinement pig building by spraying various additives // *Bioresour. Technol.* 2008. V. 99. No. 17. P. 8464–8469. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.082
62. Bibbiani C., Russo C. Odour emission from intensive livestock production system: approaches for emission abatement and evaluation of their effectiveness // *Large Anim. Rev.* 2012. No. 18. P. 135–138.
63. Melse R.W., Ogink N.W.M. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: review of on-farm research in the Netherlands // *Trans. ASAE.* 2005. V. 48. No. 6. P. 2303–2313. doi: 10.13031/2013.20094
64. Conti C., Tullo E., Bacenetti J., Guarino M. Evaluation of a wet acid scrubber and dry filter abatement technologies in pig barns by dynamic olfactometry // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. No. 7. Article No. 3219. doi: 10.3390/app11073219
65. Costantini M., Bacenetti J., Coppola G., Orsi L., Ganzaroli A., Guarino M. Improvement of human health and environmental costs in the European Union by air scrubbers in intensive pig farming // *J. Cleaner Prod.* 2020. V. 275. Article No. 124007. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124007
66. Hellshtedt M. The use of biochar-peat mixture to reduce odour from animal farms // *Agricultural Machinery and Technologies.* 2019. V. 13. No. 2. P. 27–30. doi: 10.22314/2073-7599-2018-13-2-27-30.
67. Antonious G.F. Biochar and animal manure impact on soil, crop yield and quality // *IntechOpen.* 2018. V. 25. No. 4. P. 45–67. doi: 10.5772/intechopen.77008 [Internet resource] <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77008> (Accessed: 31.10.2023)
68. Dougherty B., Gray M., Johnson M.G., Kleber M. Can biochar covers reduce emissions from manure lagoons while capturing nutrients? // *J. Environ. Qual.* 2017. V. 46. No. 3. P. 659–666. doi: 10.2134/jeq2016.12.0478
69. Opaliński S., Korczyński M., Szoltyś M., Dobrzański Z., Kołacz R. Application of aluminosilicates for mitigation of ammonia and volatile organic compound emissions from poultry manure // *Open Chem.* 2015. V. 13. P. 967–973. doi: 10.1515/chem-2015-0115
70. Wierzbńska M. The application of mineral sorbents to remove volatile organic compounds from the gases emitted from the composting processes // *J. Ecol. Eng.* 2021. V. 22. No. 2. P. 98–110. doi: 10.12911/22998993/130888

71. Yan Z., Liu X., Yuan Y., Liao Y., Li X. Deodorization study of the swine manure with two yeast strains // *Biotechnol. Bioproc. E.* 2013. V. 18. P. 135–143. doi: 10.1007/s12257-012-0313-x
72. Kim T.I., Ham J.S., Yang C.B., Kim M.K. Deodorization of pig feces by fungal application // *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 2004. V. 17. No. 9. P. 1286–1290. doi: 10.5713/ajas.2004.1286
73. Su Q., Dai D., Liao Y., Han H., Wu J., Ren Z. Synthetic microbial consortia to enhance the biodegradation of compost odor by biotrickling filter // *Bioresour. Technol.* 2023. V. 387. Article No. 129698. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129698
74. Ma Q., Liu S., Li S., Hu J., Tang M., Sun Y. Removal of malodorant skatole by two enriched microbial consortia: performance, dynamic, function prediction and bacteria isolation // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 725. Article No. 138416. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138416
75. Gutarowska B., Matusiak K., Borowski S., Rajkowska A., Brycki B. Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite - bentonite carrier // *J. Environ. Manage.* 2014. V. 141. P. 70–76. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.017
76. Ma H., Li F., Niyitanga E., Chai X., Wang S., Liu Y. The odor release regularity of livestock and poultry manure and the screening of deodorizing strains // *Microorganisms.* 2021. V. 9. No. 12. Article No. 2488. doi: 10.3390/microorganisms9122488
77. Yan Z., Li J., Liu X., Yuan Y., Liao Y., Li X. Deodorization of swine manure using a *Lactobacillus* strain // *Environ. Eng. Manage. J.* 2017. V. 16. No. 10. P. 2191–2198. doi: 10.30638/eemj.2017.226
78. Ding Y., Xiong J., Zhou B., Wei J., Qian A., Zhang H., Zhu W., Zhu J. Odor removal by and microbial community in the enhanced landfill cover materials containing biochar-added sludge compost under different operating parameters // *Waste Manage.* 2019. V. 87. P. 679–690. doi: 10.1016/j.wasman.2019.03.009
79. Chen W., Yan L., Gao Y., Bao J., Wang Y., Sun Z., Wang W. The removal characteristics and diversity of a microbial community capable of ammonia removal from compost // *Ann. Microbiol.* 2016. V. 66. P. 635–642. doi: 10.1007/s13213-015-1141-y
80. Njalam'mano J.B.J., Chirwa E.M.N., Seabi R.L. *In vitro* study of butyric acid deodorization potential by indigenously constructed bacterial consortia and pure cultures from pit latrine fecal sludge // *Sustainability.* 2020. V. 12. No. 12. Article No. 5156. doi: 10.3390/su12125156
81. Borowski S., Matusiak K., Powałowski 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
82. Bondarenko N.B., Kondakova N.V., Starovoytov S.V., Butko D.A. Technology for reducing gas emissions from livestock farms // *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2024. V. 32. No. 1. P. 32–40 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40
83. Showqi I., Lone F.A., Ashraf M., Mehmood M.A., Rashid A. Biofilters in mitigation of odour pollution – a review // *Nat. Environ. Poll. Tech.* 2016. V. 15. No. 4. P. 1177–1185.
84. Chen L., Hoff S.J. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters // *Appl. Eng. Agric.* 2009. V. 25. No. 5. P. 751–766. doi: 10.13031/2013.28854
85. Buelna G., Dubé R., Turgeon N. Pig manure treatment by organic bed biofiltration // *Desalination.* 2008. V. 231. No. 1–3. P. 297–304. doi: 10.1016/j.desal.2007.11.049
86. Reyes J., Toledo M., Michán C., Siles J.A., Alhama J., Martín M.A. Biofiltration of butyric acid: monitoring odor abatement and microbial communities // *Environ. Res.* 2020. V. 190. Article No. 110057. doi: 10.1016/j.envres.2020.110057
87. Singh A., Shareefdeen Z., Ward O.P. Bioscrubber technology // *Biotechnology for odor and air pollution control* / Eds. Z. Shareefdeen, A. Singh. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. P. 169–193. doi: 10.1007/3-540-27007-8_8
88. Le Cloirec P., Humeau P. Bioscrubbers // *Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy* / Eds. C. Kennes, M.C. Veiga. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013. P. 139–153. doi: 10.1002/9781118523360.ch6
89. Van Groenestijn J.W. Bioscrubbers // *Bioreactors for waste gas treatment* / Eds. C. Kennes, M.C. Veiga. Dordrecht: Springer, 2001. P. 133–162. doi: 10.1007/978-94-007-2439-6_3
90. Vitko T.G., Cowden S., Suffet I.H.M. Evaluation of bioscrubber and biofilter technologies treating wastewater foul air by a new approach of using odor character, odor intensity, and chemical analyses // *Water Res.* 2022. V. 220. Article No. 118691. doi: 10.1016/j.watres.2022.118691
91. Hwang O., Yun Y.M., Trabue S. Impact of *Bacillus subtilis* on manure solids, odor, and microbiome // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 333. Article No. 117390. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117390
92. Huong L.Q., Madsen H., Anh le X., Ngoc P.T., Dalsgaard A. Hygienic aspects of livestock manure management and biogas systems operated by small-scale pig farmers in Vietnam // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 470–471. P. 53–57. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.023
93. Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100. No. 22. P. 5478–5484. doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.046
94. Kovalev A.A. Alternative energy in the Sverdlovsk region // *Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya.* 2019. No. 9. P. 35–39 (in Russian). doi: 10.7868/S0233361919090040

95. Lesnitchiy V.N., Chetveryk G.A. Hydrodynamic and thermal mode of bioreactor of biogas plant // *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2012. No. 8. P. 56–59 (in Russian).
96. Keck M., Mager K., Weber K., Keller M., Frei M., Steiner B., Schrade S. Odour impact from farms with animal husbandry and biogas facilities // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 645. P. 1432–1443. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.182
97. Vanek M., Mitterpach J., Zacharova A. Odour control in biogas plant. Case study // *Proc. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Albena, Bulgaria, June 18–24, 2015. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2015. V. 1. P. 353–360. doi: 10.5593/SGEM2015/B41/17.046*
98. Andriani D., Rajani A., Kusnadi, Santosa A., Saepudin A., Wresta A., Atmaja T.D. A review on biogas purification through hydrogen sulphide removal // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* V. 483. Article No. 012034. doi: 10.1088/1755-1315/483/1/012034
99. Bejan D., Sagitova F., Bunce N.J. Evaluation of electrolysis for oxidative deodorization of hog manure // *J. Appl. Electrochem.* 2005. V. 35. P. 897–902. doi: 10.1007/s10800-005-4722-9
100. Tyagi V.K., Khan A.A., Kazmi A.A., Mehrotra I., Chopra A.K. Slow sand filtration of UASB reactor effluent: a promising post treatment technique // *Desalination.* 2009. V. 249. No. 2. P. 571–576. doi: 10.1016/j.desal.2008.12.049
101. Guchi E. Review on slow sand filtration in removing microbial contamination and particles from drinking water // *American Journal of Food and Nutrition.* 2015. V. 3. No. 2. P. 47–55. doi: 10.12691/ajfn-3-2-3
102. Vanotti M.B., Rice J.M., Ellison A.Q., Hunt P.G., Humenik F.J., Baird C.L. Solid-liquid separation of swine manure with polymer treatment and sand filtration // *Trans. ASAE.* 2005. V. 48. No. 4. P. 1567–1574. doi: 10.13031/2013.19190
103. Healy M.G., Rodgers M., Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters // *Bioresour. Technol.* 2007. V. 98. No. 12. P. 2268–2281. doi: 10.1016/j.biortech.2006.07.036
104. El Bied O., García-Valero A., Fechtali T., Faz Á., Acosta J.A. Purification performance of filtration process for pig slurry using marine sands, silty loam soils, fly ash and zeolite // *Agronomy.* 2021. V. 11. No. 8. Article No. 1608. doi: 10.3390/agronomy11081608
105. Tyndall J., Colletti J. Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review // *Agroforest. Syst.* 2007. V. 69. P. 45–65. doi: 10.1007/s10457-006-9017-6
106. Kulshreshtha S., Kort J. External economic benefits and social goods from prairie shelterbelts // *Agroforest. Syst.* 2009. V. 75. No. 1. P. 39–47. doi: 10.1007/s10457-008-9126-5
107. Lin X.J., Barrington S., Nicell J.A., Choinière D., Vézina A. Influence of windbreaks on livestock odour dispersion plume in the field // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2006. V. 116. No. 3–4. P. 263–272. doi: 10.1016/j.agee.2006.02.014
108. Lin X.J., Barrington S., Nicell J.A., Choinière D. Effect of natural windbreaks on maximum odour dispersion distance (MODD) // *Can. Biosyst. Eng.* 2007. V. 49. No. 6. P. 624–632.
109. Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed // *Global Change Biol.* 2000. V. 6. No. 8. P. 995–1003. doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00376.x
110. Agle M., Hristov A.N., Zaman S., Schneider C., Ndegwa P., Vaddella V.K. The effects of ruminally degraded protein on rumen fermentation and ammonia losses from manure in dairy cows // *J. Dairy Sci.* 2010. V. 93. No. 4. P. 1625–1637. doi: 10.3168/jds.2009-2579
111. Karau A., Grayson I. Amino acids in human and animal nutrition // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2014. V. 143. P. 189–228. doi: 10.1007/10_2014_269
112. Ojha B.K., Singh P.K., Shrivastava N. Enzymes in the animal feed industry // *Enzymes in Food Biotechnology. Production, Applications, and Future Prospects / Ed. M. Kuddus. Academic Press, 2019. P. 93–109. doi: 10.1016/B978-0-12-813280-7.00007-4*
113. Young M.C., Yun J.C. Regulation of odor gas emission and performance by probiotic *Bacillus* in livestock industry // *Arch. Anim. Poult. Sci.* 2019. No. 1 (2) P. 555–560. doi: 10.19080/AAPS.2019.01.555560
114. Wlaziło Ł., Kwiecień M., Bis-Wencel H., Łopuszyński W., Buszewicz G., Karpińska K. Assessment of health safety of pigs taking natural sorbents with feed // *BMC Vet. Res.* 2023. Article No. 19. doi: 10.1186/s12917-022-03563-3
115. Hayes E.T., Leek A.B.G., Curran T.P., Dodd V.A., Carton O.T., Beattie V.E., O'Doherty J.V. The influence of diet crude protein level on odour and ammonia emissions from finishing pig houses // *Bioresour. Technol.* 2004. V. 91. No. 3. P. 309–315. doi: 10.1016/S0960-8524(03)00184-6
116. Wesoly R., Weiler U. Nutritional influences on skatole formation and skatole metabolism in the pig // *Animals.* 2012. V. 2. No. 2. P. 221–242. doi: 10.3390/ani2020221
117. Choi W., Lee W., Kim K. Odor generation pattern of swine manure according to the processing form of feed // *J. Anim. Sci. Technol.* 2024. V. 66. No. 1. P. 219–231. doi: 10.5187/jast.2023.e48

Графовые алгоритмы для расчёта распределения следов амурского тигра на территории Приморского края

© 2024. Г. Ш. Цициашвили¹, д. ф.-м. н., г. н. с.,
В. Н. Бочарников², д. б. н., в. н. с.,
С. М. Краснопеев², к. ф.-м. н., в. н. с.,
М. А. Осипова¹, к. ф.-м. н., н. с.,

¹Институт прикладной математики
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7,
²Тихоокеанский институт географии
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7,
e-mail: guram@iam.dvo.ru

В работе анализируется распределение числа следов амурского тигра в муниципальных образованиях Приморского края по наблюдениям, полученным в период единовременного зимнего учёта, организованного Тихоокеанским институтом географии Дальневосточного отделения РАН в 2005 г. Эта задача связана с необходимостью подсчёта численности зверей по следам его жизнедеятельности. По исходным данным была сформирована выборка для анализа множества следов с целью выделить области пересечения различных районов обитания тигра в Приморском крае. Для выявления их пересечений карта муниципальных образований Приморского края была представлена в виде плоского графа, и методами теории графов был разработан рекуррентный алгоритм выделения тигриных кластеров. По ним территория Приморского края разбита на северную, центральную, южную и юго-западную зоны, имеющие пересечения. Подсчитано общее число следов в пересекающихся соседних зонах с целью выявления возможных миграций тигров между ними.

Ключевые слова: тигриные кластеры, планарные графы, число следов, зоны влияния.

Graph algorithms for calculating the distribution of the Amur tiger tracks in Primorsky Krai

© 2024. G. Sh. Tsitsiashvili¹ ORCID: 0000-0003-2600-0474¹
V. N. Bocharnikov² ORCID: 0000-0002-6574-7864²
S.M. Krasnopeev² ORCID: 0000-0001-8409-7062²
M.A. Osipova¹ ORCID: 0000-0001-5615-9449¹

¹Institute of Applied Mathematics FEB RAS,
7, Radio St., Vladivostok, Russia, 690041,
²Pacific Institute of Geography FEB RAS,
7, Radio St., Vladivostok, Russia, 690041,
e-mail: guram@iam.dvo.ru

The paper analyzes the distribution of the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) tracks in the Primorsky Krai municipalities according to observations obtained during the one-time winter count organized by the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in 2005. This task is related to the need to calculate the number of animals based on the tracks of their vital activity. Based on the initial data we form a sample to analyze a set of tracks to identify intersection areas of various tiger habitats in Primorsky Krai. The map of Primorsky Krai municipalities was presented in the form of a planar graph to identify their intersections. A recurrent algorithm for identifying tiger clusters was developed using graph theory methods. According to them, the territory of Primorsky Krai is divided into northern, central, southern and southwestern zones with intersections. The districts of Primorsky Krai included in the designated zones are listed. The total number of tracks in intersecting adjacent zones was counted to identify possible tiger migrations in Primorsky Krai. A quantitative assessment of the degree of intersection of the selected zones by the number of tiger tracks is given. The proposed calculation scheme can be used to clarify and verify the results of modeling the spatial distribution and total population size of the Amur tiger.

Keywords: tiger clusters, planar graphs, number of tracks, zones of influence.

Тигр – уникальный объект мировой фауны, самый крупный хищник Евразии, верхнее звено трофической цепи лесных экосистем Южной и Восточной Азии [1–3]. Амурский тигр *Panthera tigris altaica* – наиболее северный подвид, популяция которого полностью находится под охраной Российской Федерации (РФ) [4, 5].

Особое значение в сохранении этого вида играет знание о состоянии популяции данного хищника. В этой связи широкое распространение получили методы подсчёта численности зверей по следам его жизнедеятельности [6, 7]. К сожалению, до настоящего времени применяемые зоологами способы обработки разнообразных сведений, полученных таким путём, практически лишены специальной математической обработки. Это приводит к трудностям получения, объяснения и обсуждения территориальных закономерностей распределения амурского тигра по массовым материалам зимних маршрутных учётов [8, 9]. Местообитания амурского тигра разнообразны по характеру рельефа, растительности и экологическим условиям, но на всей территории его обитания в зимний период лежит постоянный снеговой покров, что позволяет применять методы визуальной фиксации тигриных маршрутов. Сочетание в экосистеме взаимосвязей в иерархии многих природных, природно-антропогенных и антропогенных объектов в задачах экологического мониторинга требует применения сложных информационно-технологических решений, использующих серьёзную математическую базу [10, 11].

Цель исследования – разработка и апробация нового метода математической обработки данных по выделению на территории Приморского края РФ различных зон обитания тигра и их пересечений для выявления возможных миграций тигров между ними.

Объекты и методы исследования

В современных условиях для зоологов основным методом расчёта численности следов амурского тигра является фиксирование их следов при проведении специальных учётных маршрутов в зимний период. Для расчёта числа следов выполнена индивидуальная локализация и визуализация на карте каждого следа амурского тигра. Средствами геоинформационной системы (ГИС) обрабатывали фиксированные точки регистрации следов амурского тигра.

На первом этапе выполнено геоинформационное картографирование (рис. 1) и осу-

ществлено суммирование по зарегистрированным в поле учётчиками следов тигров в пределах конкретных муниципальных образований (МО) Приморского края. Эти расчёты были сделаны на основе выборки из географической базы данных Тихоокеанского института географии ДВО РАН за 2005 год с частичным дополнением сведений из географической базы данных Амурского филиала Фонда дикой природы.

Методической сложностью для корректного восприятия материалов геоинформационного картографирования является тот факт, что некоторые тигры могут территориально находиться не в пределах одного административного района, а совершать регулярные перемещения за его пределы. Такие локализации «кочующих» тигров нельзя чётко определить, так как они могут меняться, образуя административно пересекающиеся «зоны влияния». Отчасти такие особи могут обозначаться исследователями и охотниками, хорошо знающими обследуемый участок.

Характер территориального распределения популяционных группировок амурского тигра на территории Приморского края различен. Причин возникновения такой ситуации может быть несколько. Во-первых, Приморский край обладает высоким уровнем ландшафтного разнообразия, в этой связи объективными являются существенные различия в биологической продуктивности охотничьих угодий тигра. Во-вторых, распределение тигра очень зависит от глубины снежного покрова, что по климатическим условиям не является одинаковым даже в пределах одного административного района. Нельзя также исключить индивидуальные предпочтения тигров, которые формируются в зависимости от их социального статуса, пола, возраста. Кроме того, распространение хищника корректируется фактическим антропогенным воздействием.

На втором этапе была составлена таблица 1, в которой перечислены названия МО в соответствии с номерами на карте и зарегистрированным общим числом следов тигра по данным единовременного зимнего учёта 2005 г. [12]. Из последующего рассмотрения были исключены районы, по которым нет данных о численности следов тигра, например, Артем (на рисунке 1 обозначение II), Владивосток (на рисунке 1 обозначение III).

Следует отметить, что нами для общих расчётов по кластеризации следов тигра, в отличие от обычных ориентиров на свойственные местообитания в зоологических работах,

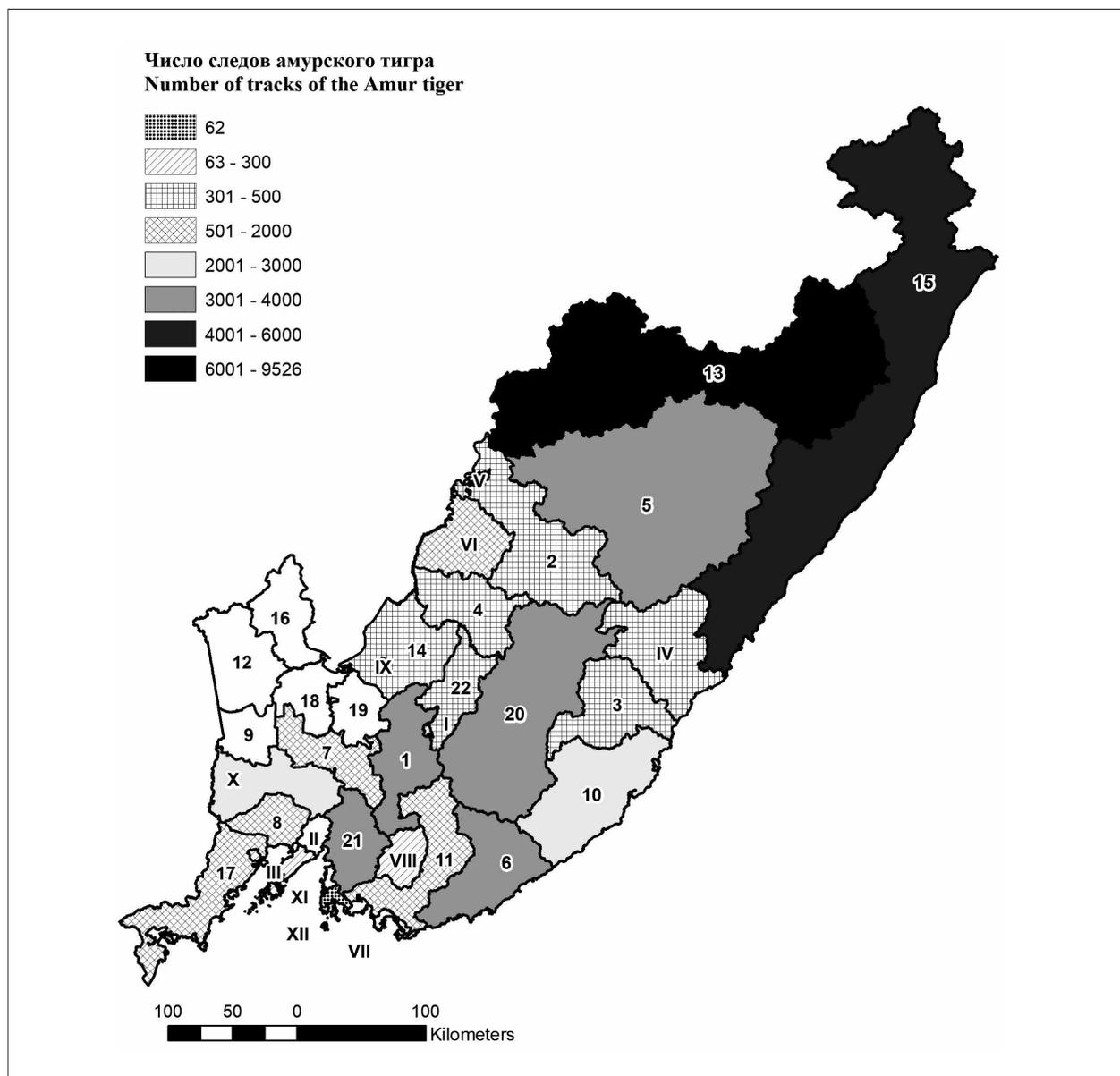


Рис. 1. Распределение числа следов амурского тигра по территории Приморского края
Fig. 1. Distribution of the *Panthera tigris altaica* tracks in Primorsky Krai

не исключались пригородные территории и категории земель, не отнесённые к государственному лесному фонду, что позволило более точно показывать пространственные закономерности распределения амурского тигра.

На третьем этапе работы предполагалось вначале построить нечёткую классификацию административных районов по наличию или отсутствию у них общих границ, а затем посмотреть, насколько следы тигров соответствуют этой классификации. В результате должны быть построены тигриные кластеры и выявлены области их пересечения. Для более корректного анализа и показа графических и картографических материалов в работе предложено использовать элементы теории графов

в контексте дополнения и усовершенствования расчётных основ определения численности амурского тигра на территории РФ.

Результаты и обсуждение

Для математической обработки полученных данных каждое МО, указанное в таблице 1, представляется как грань планарного графа (часть плоскости, ограниченная рёбрами этого графа). Далее исходному планарному графу (плоский граф, у которого рёбра не пересекаются) был сопоставлен планарный граф G_1 : вершинами графа являются грани, а рёбра соединяют две вершины, если между соответствующими гранями есть граница (рис. 2).

На втором шаге планарному графу G_1 сопоставили планарный граф G_2 . Вершинами графа G_2 являются грани, а рёбра соединяют две вершины, если между соответствующими гранями есть граница (которая может состоять не из одного ребра). Вершинами графа G_2 обозначим множества номеров вершин соответствующей грани. В нашем случае, например, вершина {10, 18, 20} графа G_2 (см. рис. 3) соответствует грани графа G_1 , являющейся треугольником с вершинами 5, 13, 15. Если в графе G_1 есть вершины, не входящие ни в какую грань, и рёбра их соединяющие, то эти вершины и рёбра без изменений входят в граф G_2 .

Аналогичным образом преобразуем планарный граф G_2 в планарный граф G_3 и т. д.

до тех пор, пока не получим граф без граней. В нашем случае эта процедура заканчивается на третьем шаге (рис. 4). Описанная выше рекуррентная процедура преобразования планарных графов похожа на процедуру построения двойственного графа (см., например, [13–15]) и связанную с ней процедуру кластеризации (см., например, [16]).

Перейдём теперь к анализу числа следов амурского тигра в построенной иерархической нечёткой классификации МО Приморского края. Для этого воспользуемся информацией о числе зимних следов тигра в этих районах (табл. 1). Подсчитаем суммарное число следов (табл. 2) в районах, соответствующих каждой вершине графа G_3 и суммарное число следов в районах, входящих в две соседние вершины,

Таблица 1 / Table 1

Число следов амурского тигра в районах Приморского края
The number of the *Panthera tigris altaica* tracks in the regions of Primorsky Krai

№ округа No. of district	Муниципальные образования Приморского края Municipalities of Primorsky Krai	Общее число тигриных следов, зафиксированное учётчиками Total number of tiger tracks recorded by census takers
1	Анучинский / Anuchinsky	3815
I	Арсеньев, окр. / Arseniev, district	64
IV	Дальнегорск, окр. Dalnegorsk, district	477
2	Дальнереченский Dalnerechensky	402
XII	ЗАТО Фокино / ZATO Fokino	62
3	Кавалеровский Kavalerovsky	422
4	Кировский / Kirovsky	455
5	Красноармейский Krasnoarmeisky	3155
6	Лазовский / Lazovsky	3196
VI	Лесозаводск, окр. Lesozavodsk, district	544
7	Михайловский / Mikhailovsky	710
8	Надеждинский / Nadezhdinsky	716
10	Ольгинский / Olginsky	2574
VIII	Партизанск, окр. Partizansk, district	245
11	Партизанский / Partizanskiy	1677
13	Пожарский / Pozharsky	9526
14	Спасский / Spassky	321
15	Тернейский / Terney	5874
X	Уссурийск, окр. Ussuriysk, district	2374
17	Хасанский / Khasansky	1404
20	Чугуевский / Chuguevsky	3699
21	Шкотовский / Shkotovsky	3206
22	Яковлевский / Yakovlevsky	448

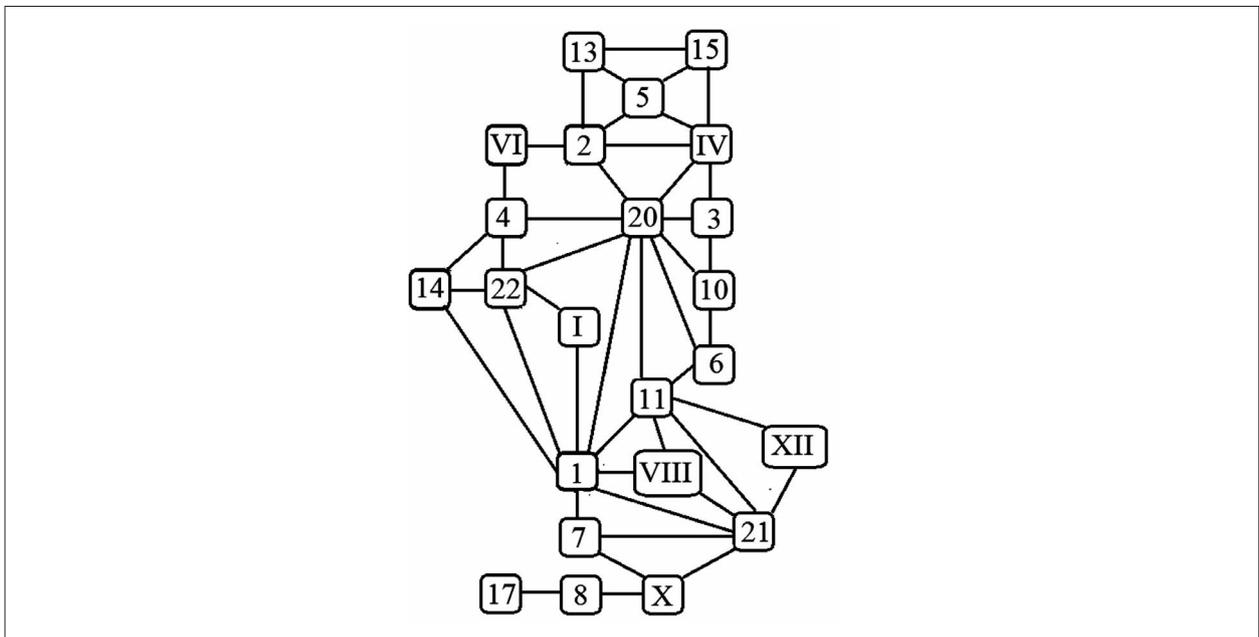


Рис. 2. Планарный граф G_1 / Fig. 2. Planar graph G_1

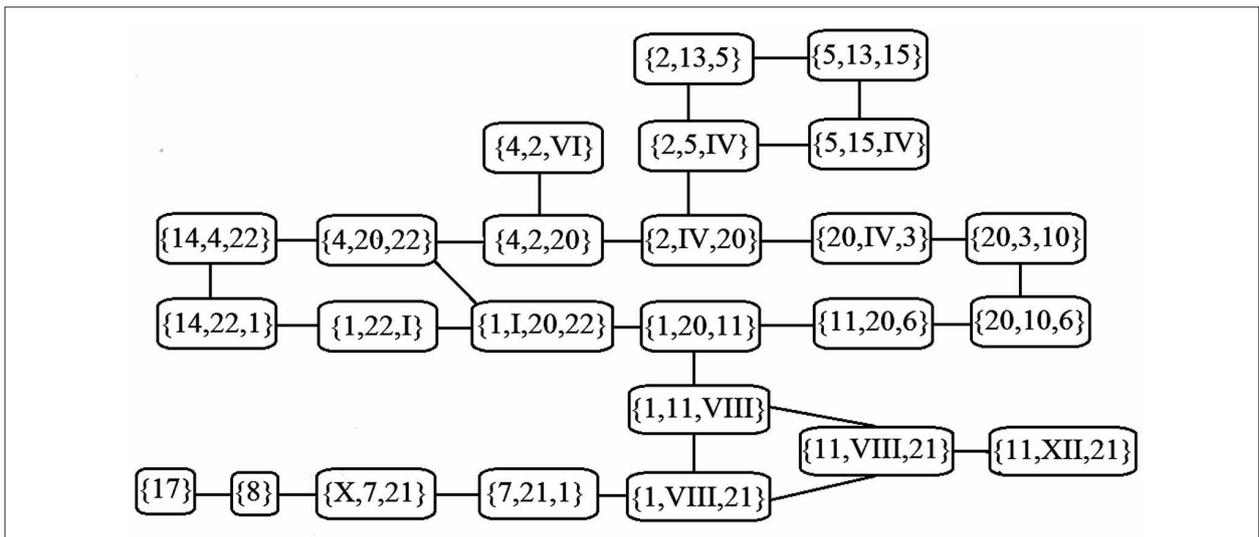


Рис. 3. Планарный граф G_2 / Fig. 3. Planar graph G_2

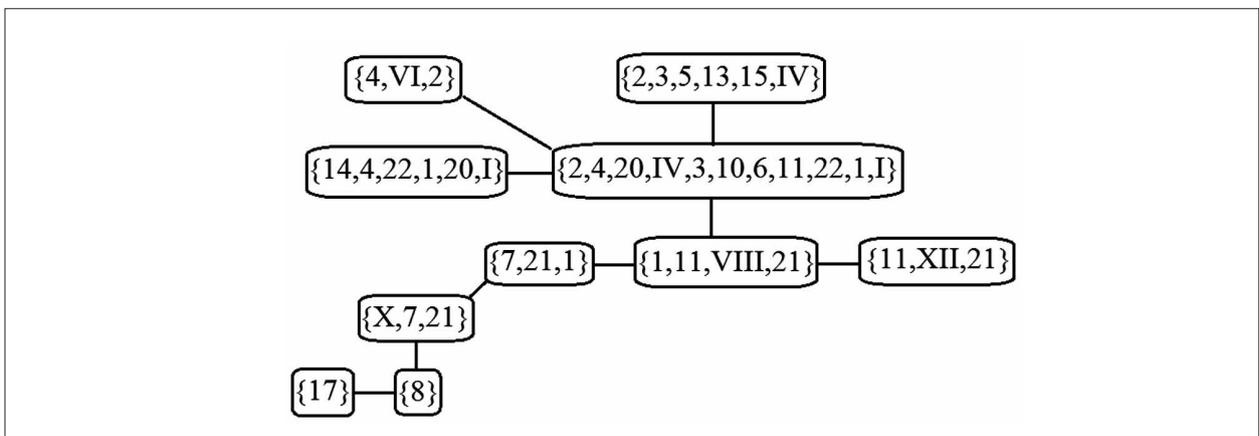


Рис. 4. Планарный граф G_3 / Fig. 4. Planar graph G_3

Таблица 2 / Table 2

Суммарное число следов тигра в вершинах графа G_3
The total number of tiger tracks at the vertices of the graph G_3

Совокупность районов в вершинах графа G_3 The set of districts at the vertices of the graph G_3	Суммарное число следов Total number of tracks	Пересечение совокупностей районов Intersection of collections of districts	Суммарное число следов в пересечении The total number of tracks in the intersection
{2,3,5,13,15,IV}	19856	{2,3,5,13,15,IV} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	1301
{2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	17229	{14,4,22,1,20,I} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	8481
{14,4,22,1,20,I}	8802	{4,VI,2} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	857
{4,VI,2}	1401	{1,11,VIII,21} и / and {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}	5492
{1,11,VIII,21}	8943	{1,11,VIII,21} и / and {11,XII,21}	4883
{11,XII,21}	4945	{1,11,VIII,21} и / and {7,21,1}	7021
{7,21,1}	7731	{7,21,1} и / and {X,7,21}	3916
{X,7,21}	6290	нет / no	0
{8}	716	нет / no	0
{17}	1404	нет / no	0

Таблица 3 / Table 3

Суммарное число следов тигра в вершинах графа G_3 , входящие в выделенные зоны
The total number of tiger tracks in the vertices of graph G_3 included in the selected zones

Зона Zone	Совокупность районов в зоне Set of districts in the zone	Суммарное число следов Total number of tracks
Северная / Northern	{2,3,5,13,15,IV}	19856
Центральная / Central	{2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}, {14,4,22,1,20,I}, {4,VI,2}	18177
Южная / South	{1,11,VIII,21}, {7,21,1}, {11,XII,21}	9715
Юго-западная South-western	{X,7,21}, {8}, {17}	8410

соединённые ребром. В нашем случае, например, вершины {7, 1, 21} и {1, 11, 21, VIII} имеют общие районы с номерами 1, 21.

Для получения этих пространственных закономерностей на основе анализа числа следов тигра в МО Приморского края (табл. 3) были выделены четыре зоны: северная (19856 следа), центральная (18177 следов), южная (9715 следов) и юго-западная зона (8410 следов) (табл. 3).

Северная зона состоит из набора районов {2,3,5,13,15, IV}. Центральная зона состоит из совокупности районов, входящих в наборы {2,4,20, IV,3,10,6,11,22,1, I}, {14,4,22,1,20,I}, {4,VI,2}, причём из 8802 следов в районах набора {14,4,22,1,20,I} большая часть (8481 следов) входят в районы набора {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}. Аналогично из 1401 следов в районах набора {4,VI,2} большая

часть – 857 следов входят в районы набора {2,4,20,IV,3,10,6,11,22,1,I}.

В свете полученных закономерностей могут быть более объяснимы нередкие и несистематизированные факты территориальных перемещений амурского тигра в соседние с Приморским краем административные субъекты РФ, как и миграции за рубеж в трансграничные с Приморьем китайские провинции [17]. Полагаем, что предложенная схема расчётов также может быть успешно применена для уточнения и верификации результатов моделирования пространственного распределения и общей численности популяции амурского тигра [18]. Это и объясняет объединение этих наборов в центральную зону. Следует отметить, что северная (19856 следов) и центральная зоны (18177) имеют всего 1301 общих следов, т. е. пересечение этих зон по следам тигров слабое

(табл. 3). Более половины следов (5492 следа) южной зоны (9715 следов) входят в центральную зону, т. е. пересечение южной и центральной зон существенно больше, чем пересечение северной и центральной зон. Юго-западная зона (8410 следов) имеет 3916 общих следов с южной зоной (9715 следов). Она включает в себя помимо набора районов {X,7,21} (6290 следов) ещё районы {8} (716 следов), {17} (1404 следа). Отметим, что южная зона состоит из совокупности районов, входящих в наборы {1,11,VIII,21}, {7,21,1}, {11,XII,21}. Причём из 7731 следов в районах набора {7,21,1} большая часть (7021 следов) входят в районы набора {1,11,VIII,21}. Аналогично из 4945 следов в районах набора {11,XII,21} большая часть (4883 следов) входит в районы набора

{1,11,VIII,21}. Это объясняет объединение этих наборов в южную зону. Однако следы в этих районах не пересекаются между собой и с набором районов {X,7,21}. Поэтому юго-западная зона состоит из непересекающихся по следам наборов районов и включение в неё этих наборов районов чисто условное.

Полученные результаты могут также быть представлены в виде карты административных районов Приморского края со штриховкой, соответствующей выделенным зонам (рис. 5). Таким образом, в прикладном аспекте интерпретации математически обработанных сведений мы получаем информацию о существовании тигриных кластеров, которые не были выявлены традиционными зоологическими способами обработки данных (см. [19, 20]).

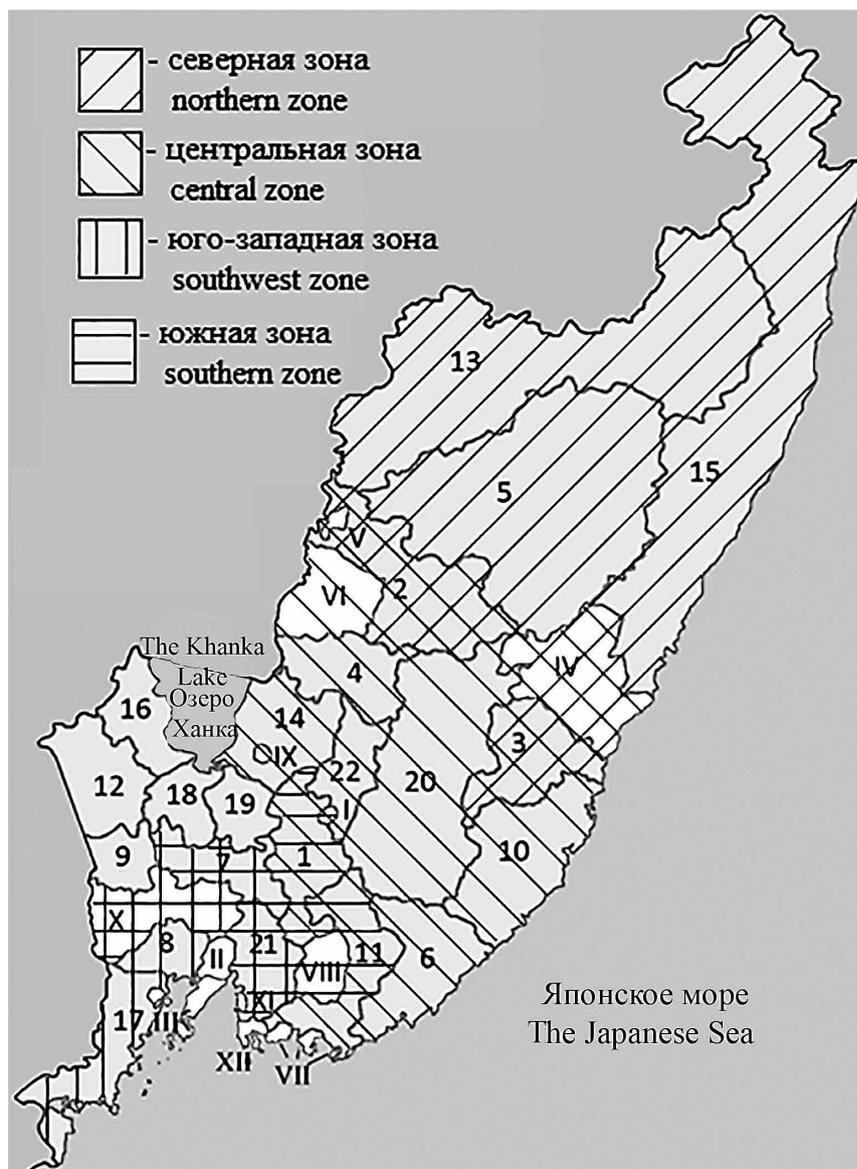


Рис. 5. Зоны обитания тигра на территории Приморского края (номера районов см. в таблице 1)
 Fig. 5. Tiger habitat areas in Primorsky Krai (see Table 1 for district numbers)

Получение новых сведений о пространственных закономерностях в распределении популяционных группировок амурского тигра даёт возможность планирования специальных полевых исследований и осуществления уточняющих учётных работ, которые представят больше эмпирического материала по планированию природоохранных мер для амурского тигра на территории Приморского края.

Заключение

Основными результатами работы являются построение специального алгоритма выделения пересекающихся зон обитания амурского тигра в Приморском крае. Этот алгоритм основан на понятии плоского графа и на данных по числу следов в МО. Подсчитано общее число следов тигра в пересекающихся соседних зонах с целью выявления возможных миграций тигров между ними. По нашему мнению использование элементов теории графов [21] позволит развить построенный в работе алгоритм и определить кратчайшие пути (по числу пересекаемых границ между МО) перемещения тигра к границам Приморского края.

Сохранение тигра – это сложная, многоплановая работа [22], и рассмотренные нами методы математической обработки больших данных позволят рассматривать новые возможности обобщения и картографирования различных типов зоологической и охотоведческой информации. В этой связи тигриные кластеры, как возможность наглядного представления и анализа данных по распределению тигра, позволяют не только обоснованно дифференцировать природоохранные меры по поддержанию численности амурского тигра, но и дают возможность получать более полную картину этологических и экологических процессов, происходящих в тигриной популяции на территории Приморского края.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Тихоокеанского института географии ДВО РАН Е.Г. Егидареву и А.А. Мурзину за обеспечение материалами и всестороннюю помощь в подготовке первичных данных.

Литература

1. Дунищенко Ю.М., Арамилев С.В. Амурский тигр: некоронованный властелин тайги. М.: АНО «Центр «Амурский тигр», 2020. 93 с.
2. Амурский тигр в России / сост. Е.Н. Матюшкин. М., 1998. 412 с.

3. Tiger politics and tiger conservation: Where the stakeholders are going wrong (commentary) [Электронный ресурс] <https://news.mongabay.com/2022/04/tiger-politics-and-tiger-conservation-where-the-stakeholders-are-going-wrong-commentary/> (Дата обращения: 13.04.2024).
4. Амурский тигр [Электронный ресурс] <https://www.rgo.ru/ru/proekty/sohranenie-redkih-vidov-amurskiy-tigr/ob-amurskom-tigre> (Дата обращения: 13.04.2024).
5. Красная книга Российской Федерации [Электронный ресурс] https://www.mnr.gov.ru/activity/red_book/krasnaya-kniga-rossiyskoy-federatsii/ (Дата обращения: 13.04.2022).
6. Абрамов К.Г. К методике учёта тигра // Вопросы организации и методы учета ресурсов фауны наземных позвоночных животных. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 53–54.
7. Юдаков А.Г., Николаев И.Г. Зимняя экология амурского тигра. Владивосток: Дальнаука, 2012. 202 с.
8. Тигры Сихотэ-Алинского заповедника: экология и сохранение / Под ред. Д.Дж. Микелл, Е.Н. Смирнова, Дж.М. Гудрич. Владивосток: ПСП, 2005. 224 с.
9. Матюшкин Е.Н. Выбор пути и освоение территории амурским тигром (по данным зимних троплений) // Поведение млекопитающих. М.: Наука, 1977. С. 146–178.
10. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Изучение лесовосстановления на основе спутниковых снимков высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 38–43.
11. Лохов А.С., Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Географо-экологическое районирование трассы нефтепровода по степени опасности воздействия на окружающую среду при аварийных разливах нефти в Арктике // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 43–48. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-043-048
12. Микелл Д.Дж., Пикунов Д.Г., Дунищенко Ю.М., Арамилев В.В., Николаев И.Г., Абрамов В.К., Смирнов Е.Н., Салькина Г.П., Мурзин А.А., Матюшкин Е.Н. Теоретические основы учёта амурского тигра и его кормовых ресурсов на Дальнем Востоке России. Владивосток: Дальнаука, 2006. 179 с.
13. Прасолов В.В. Элементы комбинаторной и дифференциальной топологии. М.: МЦНМО, 2004. 352 с.
14. Bondy A., Murty U.S.R. Graph Theory. London: Springer, 2008. 663 p.
15. Харари Ф. Теория графов. М.: URSS, 2022. 304 с.
16. Ерошенко Г.А., Краснов Я.М., Носов Н.Ю., Куклева Л.М., Никифоров К.А., Оглодин Е.Г., Кутырев В.В. Совершенствование подвидовой классификации *Yersinia pestis* на основе данных полногеномного секвенирования штаммов из России и сопредельных государств // Проблемы особо опасных инфекций. 2015. № 4. С. 58–64. doi: 10.21055/0370-1069-2015-4-58-64
17. Баранов П.В., Бочарников В.Н., Кашкаров Е.П. Глобальное потепление и вековой ритм расселения крупных кошек на северной периферии ареала // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 2 (24). С. 82–91.

18. Мурзин А.А. Построение модели динамики популяции амурского тигра и прогнозные расчёты его численности на период с 2015 по 2022 год // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 11-2. С. 333–340. doi: 10.17513/mjrfi.12501

19. Пикунов Д.Г., Серёдкин И.В., Солкин В.А. Амурский тигр (история изучения, динамика ареала, численности, экология и стратегия охраны). Владивосток: Дальнаука, 2010. 104 с.

20. Пикунов Д.Г., Микелл Д.Г., Серёдкин И.В., Николаев И.Г., Дунишенко Ю.М. Зимние следовые учёты амурского тигра на Дальнем Востоке России: методика и история проведения учётов. Владивосток: Дальнаука, 2014. 132 с.

21. Tsitsiashvili G. Processing large outliers in arrays of observations // Mathematics. 2022. No. 10 (18). Article No. 3399. doi: 10.3390/math10183399

22. Дунишенко Ю.М., Ермолин А.Б. Тигры в снегах Приамурья. Хабаровск: Хабаровская краевая типография, 2020. 61 с.

References

1. Dunishenko Yu.M., Aramilev S.V. Amur tiger: the uncrowned master of the taiga. Moskva: ANO "Tsentr "Amurskiy tigr", 2020. 93 p. (in Russian).

2. The Amur tiger in Russia / Ed. E.N. Matyushkin. Moskva, 1998. 412 p. (in Russian).

3. Tiger politics and tiger conservation: Where the stakeholders are going wrong (commentary) [Internet resource] <https://news.mongabay.com/2022/04/tiger-politics-and-tiger-conservation-where-the-stakeholders-are-going-wrong-commentary/> (Accessed: 13.04.2024).

4. Protection of endangered species: Siberian tiger [Internet resource] <https://www.rgo.ru/en/projects/protection-and-study-endangered-species/protection-endangered-species-siberian-tiger> (Accessed: 13.04.2024).

5. Red Book of the Russian Federation [Internet resource] https://www.mnr.gov.ru/activity/red_book/krasnaya-kniga-rossiyskoy-federatsii/ (Accessed: 13.04.2022).

6. Abramov K.G. To the method of counting the tiger // Voprosy organizatsii i metody ucheta resursov fauny nazemnykh pozvonochnykh zhivotnykh. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1961. P. 53–54 (in Russian).

7. Yudakov A.G., Nikolaev I.G. Winter ecology of the Amur tiger. Vladivostok: Dalnauka, 2012. 202 p. (in Russian).

8. Tigers of the Sikhote-Alin Reserve: ecology and conservation / Eds. D.G. Mikell, E.N. Smirnov, G.M. Gudrich. Vladivostok: PSP, 2005. 224 p. (in Russian).

9. Matyushkin E.N. Choice of path and development of the territory by the Amur tiger (according to winter tracking data) // Povedenie mlekopitayushchikh. Moskva: Nauka, 1977. P. 146–178 (in Russian).

10. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Study of reforestation based on high-res-

olution satellite images // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

11. Lokhov A.S., Gubaidullin M.G., Korobov V.B., Tutygin A.G. Geographical and ecological zoning of the oil pipeline route according to the degree of danger of environmental impact in case of accidental oil spills in the Arctic // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 43–48 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-043-048

12. Mikell D.J., Pikunov D.G., Dunishenko Yu.M., Aramilev V.V., Nikolaev I.G., Abramov V.K., Smirnov E.N., Salkina G.P., Murzin A.A., Matyushkin E.N. Theoretical bases of accounting for the Amur tiger and its food resources in the Russian Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 179 p. (in Russian).

13. Prasolov V.V. Elements of combinatorial and differential topology. Moskva: MTsNMO, 2004. 352 p. (in Russian).

14. Bondy A., Murty U.S.R. Graph theory. London: Springer, 2008. 663 p.

15. Harary F. Graph theory. Moskva: URSS, 2022. 304 p. (in Russian).

16. Eroshenko G.A., Krasnov Ya.M., Nosov N.Yu., Kukleva L.M., Nikiforov K.A., Oglodin E.G., Kutyrev V.V. Updating of intra-specific *Yersinia pestis* classification, based on the results of whole-genome sequencing of the strains from Russian Federation and the neighboring states // Problems of Particularly Dangerous Infections. 2015. No. 4. P. 58–64 (in Russian). doi: 10.21055/0370-1069-2015-4-58-64

17. Baranov P.V., Bocharnikov V.N., Kashkarov E.P. Global warming and century rhythm of settlement of large cats on range of northern periphery // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2013. No. 2 (24). P. 82–91 (in Russian).

18. Murzin A.A. Constructing the dynamics model of the Amur tiger population and forecast estimates of its census for the period from 2015 to 2022 // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2018. No. 11-2. P. 333–340 (in Russian). doi: 10.17513/mjrfi.12501

19. Pikunov D.G., Seryodkin I.V., Solkin V.A. The Amur tiger: history, distribution, population dynamics, ecology and conservation strategies. Vladivostok: Dalnauka, 2010. 104 p. (in Russian).

20. Pikunov D.G., Mikell D.G., Sereдкин I.V., Nikolaev I.G., Dunishenko Yu.M. Winter track surveys of Amur tigers in the Russian Far East (methods and history of tiger surveys). Vladivostok: Dalnauka, 2014. 132 p. (in Russian).

21. Tsitsiashvili G. Processing large outliers in arrays of observations // Mathematics. 2022. No. 10 (18). Article No. 3399. doi: 10.3390/math10183399

22. Dunishenko Yu.M., Ermolin A.B. Tigers in the snows of the Amur region. Khabarovsk: Khabarovskaya kraevaya tipografiya, 2020. 61 p.

Определение величин кормового коэффициента и коэффициента использования кормовой базы рыбами- планктонофагами в нижнем течении реки Вычегды

© 2024. Н. Г. Отченаш, специалист,
И. И. Студёнов, к. б. н., зам. руководителя филиала, И. Ю. Македонская, ст. специалист,
Е. В. Медведева, специалист, М. А. Студёнова, ст. специалист,
Г. В. Фукс, к. б. н., с. н. с., В. С. Шерстков, ст. специалист,
Р. А. Мельник, специалист, Л. В. Парухина, ст. специалист,
Северный филиал ФГБНУ «ВНИРО»,
163002, Россия, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 17,
e-mail: otchenash@severniro.vniro.ru

Проведено исследование компонентов водной экосистемы нижнего течения р. Вычегды. За вегетационный период 2022 г. было обнаружено 234 вида фитопланктона, относящихся к 8 отделам, и 45 видов зоопланктона, относящихся к 3 таксономическим группам, а также 6 видов рыб. Был получен материал по 150 личинкам и малькам уклейки и ерша. Показатель коэффициента использования кормовой базы (K_E) для фитопланктона составил в среднем 0,033, для зоопланктона – 0,11. Коэффициент усвоенной пищи зоопланктоном (K_3) соответствовал в среднем 0,348 (34,8%), аналогичный показатель для рыб-планктонофагов не превышал 0,3 (30%). Кормовые коэффициенты фитопланктона и зоопланктона для нижнего течения р. Вычегды в среднем составили 30 и 9 соответственно. Таким образом, кормовые коэффициенты, рассчитанные нами в вегетационный сезон 2022 г., близки к зональным для Северного рыбохозяйственного бассейна. Результаты исследований могут быть использованы для разработки мер по сохранению водных биоресурсов и среды их обитания.

Ключевые слова: река Вычегда, кормовой коэффициент, коэффициент использования кормовой базы, коэффициент усвоенной пищи, фитопланктон, зоопланктон.

Determination of the values of feeding coefficient and the coefficient of feed utilization by planktonophagous fish in the lower reaches of the Vychegda River

© 2024. N. G. Otchenash,
I. I. Studenov ORCID: 0000-0002-0826-2537, I. Yu. Makedonskaya ORCID: 0000-0002-7723-0184
E. V. Medvedeva ORCID: 0000-0001-6226-9951, M. A. Studenova ORCID: 0000-0001-5778-190X
G. V. Fuks ORCID: 0000-0003-0617-3562, V. S. Sherstkov ORCID: 0000-0001-6132-500X
R. A. Melnik ORCID: 0000-0002-7791-229X, L. V. Paruhina ORCID: 0000-0003-2010-0861
Northern branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
17, Uritskogo St., Arkhangelsk, Russia, 163002,
e-mail: otchenash@severniro.vniro.ru

This paper presents the results of studies of the aquatic ecosystem components of the lower reaches of the Vychegda River. During 2022 growing season we found 234 species of various microalgae belonging to 8 departments. The phytoplankton community is diatom-green with small forms of organisms from other departments. 45 taxonomic units represented the zooplankton community over the entire period of research. We identified 20 taxa of Cladocera, 11 taxa of Copepoda, and 14 taxa of Rotatoria. Widespread Palearctic organisms formed the community. According to the results of control catches, six species of fish were identified: roach, perch, bream, ruff, silver bream and walleye. Perch and roach dominated the catches (87.7% of the catch). Material on 150 larvae and fry of bleak and ruff was obtained. The coefficient of feed utilization (K_E) for phytoplankton averaged 0.033, for zooplankton – 0.11. The coefficient of assimilated food by zooplankton (K_3) corresponded to an average of 0.348 (34.8%), the same indicator for planktonophagous fish was not above 0.3 (30%). The feeding coefficients of phytoplankton and zooplankton for the lower reaches of the Vychegda River averaged 30 and 9, respectively. Thus, the obtained feeding coefficients in 2022 growing season are close to the zonal ones for the Northern Fisheries Basin. The research results can be used to develop measures for the conservation of aquatic biological resources and their habitat.

Keywords: the Vychegda River, feeding coefficient, feed utilization coefficient, coefficient of assimilated food, phytoplankton, zooplankton.

Методикой определения последствий негативного воздействия на окружающую среду (Приказ Росрыболовства от 06.05.2020 г. № 238) и Методикой исчисления размера вреда, причинённого водным биологическим ресурсам (Приказ Минсельхоза России от 31.03.2020 г. № 167) утверждён порядок определения размера вреда, наносимого водным биоресурсам и среде их обитания, а также продукционные коэффициенты, определённые для рыбохозяйственных бассейнов. Однако такие коэффициенты не установлены для бассейна р. Северная Двина, в частности – для нижнего течения р. Вычегды.

Цель работы – определение величин кормового коэффициента и коэффициента использования кормовой базы рыбами в нижнем течении р. Вычегды для возможности определения размера вреда, наносимого водным биоресурсам и среде их обитания в результате использования водных ресурсов.

Объекты и методы исследования

Вычегда – река на севере Европейской части России в Республике Коми и Архангельской области. Длина – 1130 км, впадает в р. Северную Двину вблизи г. Котласа [1, 2]. Работы проводили в Архангельской облас-

ти, в нижнем течении р. Вычегды, в районе г. Коряжмы (рис.).

Отбор гидробиологических и ихтиологических проб осуществлялся 5 июня 2022 г. (1 этап), 20 июня (2 этап), 4 августа (3 этап), 21 сентября (4 этап) и 12 октября (5 этап). Пробы отбирали двукратно с временным промежутком в 24 ч при максимальной высоте солнца над горизонтом.

Сбор и обработку проб фитопланктона и зоопланктона, а также сбор и анализ материалов на питание молоди рыб выполняли согласно стандартным методикам [3–12]. Неполовозрелые формы веслоногих раков учитывали как отдельные таксоны [13]. Всего было проанализировано питание 150 сеголетков уклейки и ерша. Лов рыбы старших возрастов осуществляли ставными жаберными сетями с ячеей 16–40 мм.

Показатель коэффициента использования кормовой базы (K_E) рассчитывали как обратную величину кормового коэффициента (KK), то есть $K_E = 1/KK$. Согласно Приказу Минсельхоза России от 31.03.2020 г. № 167, KK вычисляется как отношение массы потреблённой пищи к величине прироста веса организма за определённый промежуток времени. Величину KK определяли, исходя из величины суточного рациона рыб по урав-

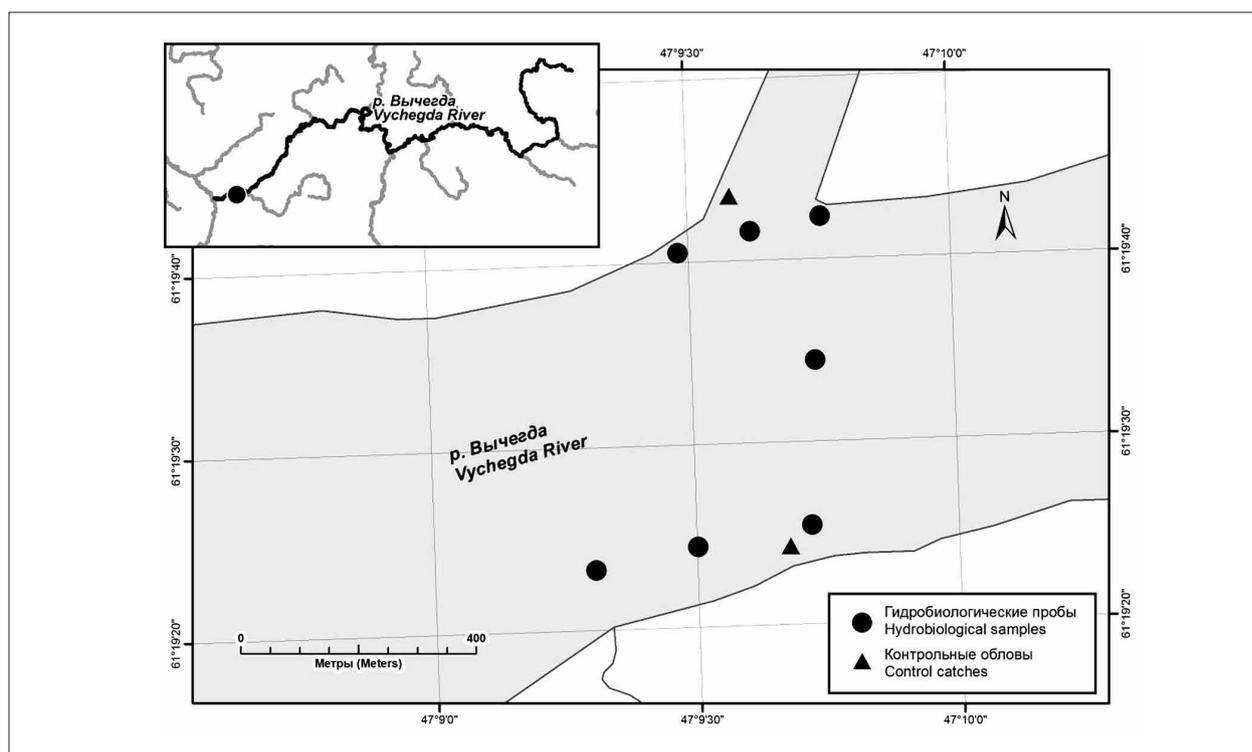


Рис. Сетка станций ежемесячного отбора гидробиологических и ихтиологических проб в нижнем течении р. Вычегды в вегетационный период 2022 г.

Fig. Grid of stations for monthly hydrobiological and ichthyological sampling in the lower reaches of the Vychegda River in 2022 growing season

нению балансового равенства Винберга [14], по формуле:

$$C = P + R + F, C = (P + R) \cdot 1,25,$$

где C – суточный рацион рыбы (Дж, г); P – энергия, идущая на прирост массы тела (Дж, мг); R – энергия, идущая на функциональный обмен, F – не усвоенная часть рациона (20%) [14].

В расчётах с использованием температурной поправки учитывали скорость потребления кислорода в зависимости от размера организма и изменения температуры среды [15].

Для расчёта энергии, идущей на функциональный обмен (R), использовали формулу:

$$R = a \cdot 20,33 \cdot 24 \cdot W_{cp} \cdot k \cdot 1,5/q \cdot C_c,$$

где a – коэффициент, равный обмену рыбы при массе тела, равной единице; 20,33 – энергетический эквивалент кислорода (Дж/мг O_2); 24 – количество часов в сутках; W_{cp} – средняя масса рыбы (мг); k – коэффициент скорости изменения энергетического обмена, при повышении массы рыбы (для карповых рыб 0,98 [14]); 1,5 – принятое соотношение средней скорости обмена, в природных условиях и стандартного, характеризует увеличение расхода энергии рыбой во время поиска корма; q – температурная поправка, рассчитанная Г.Г. Винбергом [17]; C_c – энергетический эквивалент сырого вещества рыбы (4,184 Дж/мг [14]).

Расчёт энергии, идущей на прирост массы тела, (P) проводили по формуле:

$$P = C_w \cdot W_{cp},$$

где C_w – удельная скорость роста рыбы; W_{cp} – средняя масса рыбы, мг.

Удельная скорость роста рыб рассчитывается по уравнению:

$$C_w = \lg W_2 - \lg W_1 / 0,4343 \cdot (t_2 - t_1),$$

где W_2 – конечная масса рыбы, мг; W_1 – начальная масса рыбы, мг; 0,4343 – коэффициент перехода от массы ко времени; $(t_2 - t_1)$ – продолжительность периода роста рыб.

Суточную продукцию зоопланктона рассчитывали на основании биомассы трофических групп физиологическим методом. Дыхание зоопланктона определяли, используя уравнение связи между скоростью потребления кислорода и массой животного:

$$R_{O_2} = 0,143 \cdot W^{0,803} \text{ (для Cladocera),}$$

$$R_{O_2} = 0,2 \cdot W^{0,777} \text{ (для Copepoda),}$$

$$R_{O_2} = 1,5 \cdot W^{0,7} \text{ (для Rotifera),}$$

где R_{O_2} – скорость потребления кислорода, в мл O_2 :экз./ час $^{-1}$; W – масса особи в мг. При переводе в калории использовали оксикалорийный коэффициент 4,86 кал/мл O_2 [16].

Для расчёта продукции зоопланктона использовали формулу:

$$P_{zoo} = R_{O_2} \cdot K_2 / (1 - K_2) \text{ (мг/м}^3\text{)},$$

Коэффициент эффективности использования энергии для зоопланктонных организмов (отношение прироста биомассы к ассимилированной пище), K_2 для Copepoda фильтраторов-фитофагов составлял 0,2, для Cladocera – 0,35, для нехищных Rotifera – $K_2=0,4$, для хищных Copepoda, Cladocera и Asplanchna – $K_2=0,3$ [17]. Суточный рацион рассчитывали по формуле:

$$C = P_{zoo} / K_1 \text{ (мгС/м}^3\text{)},$$

где K_1 – коэффициенты использования потреблённой пищи на рост, равные для мирных животных 0,22, для хищных и всеядных копепод – 0,16; для всеядных коловраток рода *Asplanchna* – 0,28 [17]. При расчёте дыхания (R_{O_2}) вносили температурную поправку Q_{10} , принятую равной 2,25 [15]. Принимая, что масса сухого вещества фитопланктона составляет примерно 15% от его сырой массы, для перевода биомассы суточного рациона зоопланктона в миллиграммы использовали коэффициент 0,15 [18]. Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием статистического пакета программы Microsoft Office Excel 2013.

Результаты и обсуждение

В нижнем течении р. Вычегды за период исследований было обнаружено 234 вида микроводорослей, относящихся к 8 отделам, наибольший вклад в видовое богатство приносили представители диатомовых и зелёных водорослей. В течение исследуемого периода численность и биомасса фитопланктона находились в рамках сезонной изменчивости. Максимальные показатели численности и биомассы наблюдались 20.07.2022 г., изменяясь в пределах 114,56–201,68 млн кл./м 3 и 172,63–277,87 мг/м 3 соответственно. Минимальные показатели наблюдались 13.10.2022 г., варь-

ируя от 27,04 до 51,76 млн кл./м³ и 73,01–149,43 мг/м³, что можно объяснить снижением концентрации биогенных элементов. За весь период наблюдений средняя численность и биомасса фитопланктона в нижнем течении р. Вычегды в 2022 г. составили 101,41 млн кл./м³ и 158,45 мг/м³, соответственно.

По результатам исследований альгоценоз р. Вычегды характеризовался как диатомово-зелёный с преобладанием широко распространённых мелких видов микроводорослей. Чётко прослеживался рост количественных показателей фитопланктона за счёт мелких теплолюбивых видов, что объясняется повышением солнечной активности и среднесуточных температур. В целом, уровень развития и продукционные характеристики фитоценоза данных территорий в период наблюдений соответствовал стадиям сукцессионного цикла развития фитопланктонных сообществ.

Зоопланктон нижнего течения р. Вычегды за весь период исследований был представлен 45 таксономическими единицами. Cladocera – 20 таксонов; Copepoda – 11 таксонов; Rotatoria – 14 таксонов. Максимальное число идентифицированных видов было отмечено в третий этап исследований (4 августа) – 30 видов. Минимальное число видов было отмечено в октябре, когда наблюдались спад и завершение вегетационного периода и были обнаружены 12 видов зоопланктёров, при среднем показателе за весь период исследований в 19 видов. Среднелетнее число видов составляло 21, среднеосеннее – 15 экземпляров, соответственно.

Общая биомасса и общая численность зоопланктона в районе исследований за период с июня по октябрь колебались в пределах от 2,22 мг/м³ и 183 экз./м³ в октябре до 19,72 мг/м³ 5 июня и 3204 экз./м³ в августе, соответственно. Средние показатели за весь период исследований составляли 11,066 мг/м³ и 1375 экз./м³. Среднелетние продукционные показатели составляли 16,81 мг/м³ и 2165 экз./м³, среднеосенние – 2,455 мг/м³ и 189 экз./м³, соответственно. Пик развития зоопланктона приходился на июль – август 2022 г., после понижения среднесуточных температур наблюдалось резкое снижение общей численности и биомассы зоопланктона, а также сокращение числа видов, с последующим завершением вегетации. Несмотря на различия видового состава каждого этапа, была группа таксонов, встречающихся на протяжении всего периода исследований. В неё вошли *Asplanchna priodonta*, *Bosmina longirostris*, *Thermocyclops oithonoides* и мелкие Cyclopoida. Количественные показатели изу-

ченного зоопланктонного сообщества в 2022 г. были крайне низкими. Сообщество было сформировано широко распространёнными палеарктическими организмами. Река классифицировалась как коловратно-клагоцернокопеподный, крайне бедный олиготрофный водоток. По развитию кормовой базы исследованная акватория относилась к малокормным для рыб-планктонофагов [19, 20].

Рыбное сообщество низовьев р. Вычегды в 2022 г., по результатам контрольных обловов, было представлено 6 видами: плотва, окунь, лещ, ёрш, густера и судак. В уловах преобладали окунь и плотва, на долю которых пришлось 87,7% вылова.

В ходе исследований был получен материал по личинкам и малькам двух видов рыб: уклейки *Alburnus alburnus* и ерша *Gymnocephalus cernua*. Размерный ряд молоди уклейки составляли особи длиной от 1,7 до 3,2 см (AD) и массой от 51,5 до 295,6 мг. Анализ содержимого желудочно-кишечных трактов показал, что к числу основных компонентов питания относились представители Chironomidae, кроме того, встречались зоопланктёры – представители Cladocera, в частности из pp. *Disparalona*, *Calanoida*, *Cyclopoida*, *Harpacticoida*, что согласуется с литературными данными [21]. Среди прочих компонентов пищи в питании уклейки встречались фрагменты и семена растений, яйца беспозвоночных животных.

Любая хозяйственная деятельность, ведущаяся на водных объектах, неблагоприятно сказывается на гидробионтах, нарушая условия их естественного обитания и воспроизводства. Изъятие водных ресурсов для хозяйственной деятельности снижает запасы планктонных организмов, как потенциальной кормовой базы гидробионтов. Величина суточной продукции зоопланктона является важнейшим показателем функционирования трофических сетей пресноводных экосистем [16]. Суточная продукция зоопланктона (P_{zoo}) нижнего течения р. Вычегды значительно менялась в зависимости от периода исследований. Наибольшие значения суточной продукции были отмечены в августе, что связано с увеличением численности мирных коловраток. Суточная продукция зоопланктона в августе составляла 4,099 мг/м³сут. Минимум P_{zoo} наблюдался на 2 этапе исследований (P_{zoo} 0,729 мг/м³сут.), что объясняется доминированием ветвистоусых рачков, обладающих более низкими продукционными показателями [22]. Суточные P/B (P/B_{zoo} /сут.) коэффи-

циенты зоопланктонных сообществ также изменялись в зависимости от сезона. Минимальное среднее значение P/B_{200} /сут. – 0,042 было отмечено для второго этапа исследований. Максимальное среднее значение P/B_{200} /сут. составляло 0,939, и наблюдалось в сентябре, в четвёртый этап исследований. Среднее значение P/B_{200} /сут. для исследованного периода с 5 июня по 12 октября составило 0,36.

Исходя из суточных продукционных показателей трофических групп зоопланктонных сообществ, были рассчитаны функциональные показатели зоопланктона и отношение P/B по сезонам и за весь вегетационный период. Величина P/B_{200} составляла от 2 в весенний период до 19 в летний период, осенний показатель составлял 13. Значение P/B_{200} за весь вегетационный период в среднем не превышало 12. Показатели P/B_{200} исследованного зоопланктонного сообщества в целом были невысоки и соответствовали олиготрофному статусу водоёмов [17], что совпадает с оценкой трофического статуса нижнего течения р. Вычегды по количественным показателям зоопланктона [19].

Среди рыбного населения нижнего течения р. Вычегды нет прямых потребителей фитопланктона, поэтому коэффициент эффективности использования пищи рассчитывался в объединённой пищевой цепи «фитопланктон – зоопланктон – рыбы». Кормовой коэффициент для фитопланктона ($KK_{\text{фит}}$) вычислялся как отношение массы потреблённой пищи к величине прироста массы зоопланктонного организма за определённый промежуток времени, исходя из рациона каждого потребителя. Величина рассчитывалась, исходя из суммарного суточного рациона (Cc_{200}) всех зоопланктёров сообщества. Частные рационы рассчитывались пропорционально их биомассе с учётом

их биомассы в водоёме, их избирательного питания и доступности основных трофических ресурсов [18]. Основу зоопланктонного сообщества нижнего течения р. Вычегды составляли мирные и всеядные организмы. Максимальная величина Cc_{200} (129,04 мг/м³) была отмечена в августе, что объясняется максимумами значений биомасс зоопланктёров и доминированием коловраток (мирные фильтраторы), поглощающих наибольшее количество фитопланктона [16]. Минимальные суточные рационы (21,6 мг/м³) наблюдались в октябре, что связано со снижением вегетативной активности зоопланктонных организмов, сокращением их численности и изменением возрастной структуры (табл. 1).

$KK_{\text{фит}}$ для нижнего течения р. Вычегды для вегетационного сезона в 150 сут составил 30, при этом минимальные значения коэффициента были отмечены для осеннего периода (22), что связано с сокращением численностей зоопланктёров, изменением их возрастного состава и в целом завершением вегетации. Для весеннего и летнего периодов $KK_{\text{фит}}$ составлял 32 (табл. 2). Такие величины выше принятых и применяемых для водных объектов Красноярского края (10), но ниже аналогичных показателей рек Чёрного моря (40), что указано в Приказе Минсельхоза России от 31.03.2020 г. № 167.

Кормовой коэффициент для зоопланктона (KK_{200}) вычислялся как отношение массы потреблённых зоопланктонных организмов к величине прироста массы планктонофага за определённый промежуток времени. Величина KK_{200} определяется для каждого водоёма индивидуально, исходя из величины суточного рациона рыб. Исследования содержимого пищеварительных трактов планктоноядных рыб нижнего течения р. Вычегды (уклейка

Таблица 1 / Table 1

Изменения суточного рациона (Cc_{200} , мгС/м³) зоопланктона нижнего течения р. Вычегды в июле–октябре 2022 г. с пересчётом единиц углерода в биомассу потреблённого фитопланктона ($Cc_{\text{фит}}$, мг/м³)
Changes in the daily diet (Cc_{200} , mgC/m³) of zooplankton of the lower reaches of the Vychehda River in July – October 2022 with conversion of carbon units into biomass of consumed phytoplankton ($Cc_{\text{фит}}$, mg/m³)

Показатели Parameters	Период / Period				
	1 этап (05.07.2022) 1 stage	2 этап (20.07.2022) 2 stage	3 этап (05.08.2022) 3 stage	4 этап (21.09.2022) 4 stage	5 этап (12.10.2022) 5 stage
	Cladocera	3,2±0,5	2,34±0,13	3,16±0,21	2,22±0,13
Copepoda	1,1±0,1	0,9±0,1	2,66±0,21	3,73±0,18	0,44±0,02
Rotifera	2,4±0,5	0,06±0,02	13,5±1,4	6,5±1,3	1,62±0,05
Σ	6,752	3,574	19,356	12,482	3,240
Cc_{200} , мг/м ³ Cc_{200} , mg/m ³	45,013	23,827	129,040	83,213	21,600

Таблица 2 / Table 2

Сезонные изменения кормового коэффициента фитопланктона (KK_{phit}) для нижнего течения р. Вычегды в 2022 г. / Seasonal changes in phytoplankton feeding coefficient (KK_{phit}) for the lower reaches of the Vycheгда River in 2022

Этапы Stages	Длительность периода, сут Duration of the period, days	P_{zoo} , мг/м ³ период mg/m ³ period	C_{zoo} , мг/м ³ период mg/m ³ period	KK_{phit}
1, весна / spring	30	42,51	1350,39	32
2, лето / summer	30	21,87	714,81	32
3, лето / summer	30	122,97	3871,20	
4, лето / summer	30	75,69	2496,39	
5, осень / autumn	30	29,61	648,00	22

Таблица 3 / Table 3

Сезонные изменения расчётных показателей, применяемых для формирования кормовых коэффициентов зоопланктона в нижнем течении р. Вычегды в 2022 г. / Seasonal changes in the calculated indicators used for zooplankton feeding coefficients forming in the lower reaches of the Vycheгда River in 2022

Расчётные показатели Calculated indicators	1–2 этапы Stages 1–2	2–3 этапы Stages 2–3	3–4 этапы Stages 3–4	4–5 этапы Stages 4–5
C , мг/экз./сут. C , mg/ind./day.	2,32	7,21	17,21	10,47
$P_{\text{сут}}$, мг/экз./сут P_{day} , mg/ind./day	0,29	0,71	2,60	0,84
R , Дж/экз./сут. R , J/ind./day	1,94	8,57	8,57	24,73
P , Дж/экз./сут. P , J/ind./day	1,80	3,09	12,96	3,48
K_p , Дж/мг K_p , J/mg	2,02	2,02	2,02	3,37
C_w , мг/экз./сут. C_w , mg/ind./day	0,08	0,06	0,04	0,01
W_1 , мг/экз. W_1 , mg/ind.	2,28	6,85	18,50	142,90
W_2 , мг/экз. W_2 , mg/ind.	6,85	18,50	142,90	160,50
$W_{\text{сп}}$, мг/экз. $W_{\text{сп}}$, mg/ind.	4,56	12,50	80,53	151,70
Температура воды, °C Water temperature, °C	20	26	10	7
q ($t_2 - t_1$), сут./day	1	0,61	2,5	3,98
KK_{zoo}	8	10	7	12
K_{Ezoo}	0,12	0,1	0,15	0,08
K_{Zzoo}	0,28	0,27	0,53	0,12

Примечание: расшифровку расчётных показателей см. в тексте.
Note: see the text for a breakdown of the calculated indicators.

Alburnus alburnus (Linnaeus, 1758)) показало, что зоопланктон входит в пищевой рацион только особей первого года жизни. Исследования пищеварительных трактов молоди уклейки показало пищевую избирательность в пользу кладоцер (ветвистоусые рачки).

И лишь в октябре, в связи с сокращением численности зоопланктона в целом, и, как следствие, нехваткой предпочитаемого трофического ресурса, в рацион помимо кладоцер входили ещё циклопоиды и, предположительно, коловратки.

Средняя масса молоди уклейки колебалась в пределах от 2,28 мг/экз. в первый этап исследований (05.07.22) до 160,5 мг/экз. на заключительном этапе (12.10.2022 г.), суточная продукция ($P_{сут}$) составляла от 0,29 мг/экз./сут. до 2,60 мг/экз./сут., в первый и четвёртый этапы соответственно. Расчёт суточного рациона (C) молоди уклейки с первого по четвёртый этап был выполнен при фактической калорийности пищевого комка (K_p) 2,02 Дж/мг (ветвистоусые рачки), с четвёртого по пятый этап фактическая калорийность пищевого комка составляла 3,367 Дж/мг (ветвистоусые рачки, коловратки) [18]. Исходя из суточной продукции молоди уклейки и ерша, а также массы их суточного рациона, KK_{200} составлял от 7 с третьего по четвёртый этап, до 12 с четвёртого по пятый этап (табл. 3).

Заключение

Исходя из полученных данных, можно сделать следующие выводы. За вегетационный период 2022 г. было обнаружено 234 видов фитопланктона, относящихся к 8 отделам, 45 таксономических единиц зоопланктона и 6 видов рыб. Уровень развития и продукционные характеристики фито- и зоопланктона соответствовали стадиям сукцессионного цикла развития планктонных сообществ и согласовались с данными, полученными в предыдущих исследованиях [23]. Продукционные процессы в зоопланктонном сообществе протекают неактивно, с весенним минимумом и летним максимумом. Величина отношения P/B зоопланктона составляла от 2 в весенний период до 19 в летний период и 12 за весь вегетационный период в среднем.

Кормовой коэффициент фитопланктона для нижнего течения р. Вычегды в среднем составил 30, при минимальных значениях коэффициента осеннего периода (22); для весеннего и летнего периодов составлял 32. Подобные показатели сопоставимы с кормовыми коэффициентами фитопланктона северных морей. Показатель коэффициента использования кормовой базы (K_{Ephit}) для фитопланктона колебался в пределах от 0,03 до 0,046 и составил в среднем за вегетационный сезон 0,033. Коэффициент усвоенной пищи (K_{3phit}) составлял от 0,32 до 0,39 при среднем значении 0,348, что соответствует 34,8%.

Кормовой коэффициент для зоопланктона нижнего течения р. Вычегды в период исследований с 5 июля по 12 октября 2022 г. колебался в пределах от 7 до 12 и составил в среднем 9. Показатель коэффициента использования

кормовой базы (K_{Ezoo}) для зоопланктона колебался в пределах от 0,08 до 0,15 и составил в среднем 0,11. Коэффициент усвоенной пищи K_{3zoo} составлял от 0,12 до 0,53 при среднем значении 0,3, что соответствует 30%.

Таким образом, кормовые коэффициенты, определённые в вегетационный сезон 2022 г., близки к зональным для Северного рыбохозяйственного бассейна, варьирующим, по литературным источникам и нормативным документам, для зоопланктона в пределах 8–10, для фитопланктона – в пределах 22–32.

Литература

1. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 610 с.
2. Государственный водный реестр [Электронный ресурс] <http://www.textual.ru> (Дата обращения: 19.11.2020).
3. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Ред. В.А. Абакумов. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 317 с.
4. Плотников Г.К., Пескова Т.Ю., Шкуте А., Пупиня А., Пупиньш М. Сборник классических методов гидробиологических исследований для использования в аквакультуре. Даугавпилс: Академическое издательство Даугавпилсского университета «Сауле», 2017. 282 с.
5. Диатомовый анализ. Кн. 2. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей: Порядки Centrales и Mediales / Ред. А.И. Прошкина-Лавренко. М.: Госгеолиздат, 1949. 238 с.
6. Диатомовый анализ. Кн. 3. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей: Порядок Pennales / Ред. А.И. Прошкина-Лавренко. М.: Госгеолиздат, 1950. 398 с.
7. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. Синезелёные водоросли / Ред. М.М. Голлербах, Е.К. Косинская, В.И. Полянский. М.: Советская наука, 1953. 651 с.
8. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. Диатомовые водоросли / Ред. М.М. Забелина, И.А. Киселев, А.И. Прошкина-Лавренко, В.С. Шешукова. М.: Советская наука, 1951. 618 с.
9. Ракообразные (Crustacea) Беларуси [Электронный ресурс] <https://crustacea-g2n.mozello.com/> (Дата обращения: 23.10.2019).
10. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В.Р. Алексеев, С.Я. Цалолыхин. СПб: Зоологический ин-т РАН; М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2010. 494 с.
11. Мануйлова Е.Ф. Ветвистоусые рачки (Cladocera) фауны СССР. М.; Л.: Наука, 1964. 327 с.
12. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях / Ред. Е.В. Боруцкий. М.: Наука, 1974. 254 с.

13. Лоскутова О.А., Кононова О.Н. Зообентос и зоопланктон предгорных озёр Приполярного Урала // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 56–62. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-056-062

14. Винберг Г.Г. Интенсивность обмена и пищевые потребности рыб. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1956. 253 с.

15. Винберг Г.Г. Температурный коэффициент Вант-Гоффа и уравнение Аррениуса в биологии // Журн. общ. биол. 1983. Т. 44. № 1. С. 3–42.

16. Лазарева В.И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2010. 183 с.

17. Андроникова И.Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озёрных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.

18. Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 150 с.

19. Китаев С.П. Экологические основы биопроductивности озёр разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.

20. Пидгайко М.Л., Александров Б.М., Иоффе Ц.И., Максимова Л.П., Петров В.В., Саватеева В.В., Салазкин А.А. Краткая биолого-продукционная характеристика водоёмов северо-запада СССР. Т. 67. Л.: ГосНИОРХ, 1968. С. 205–228.

21. Бусева Ж.Ф., Плюта М.В. Питание молоди рыб в литорали мелководного озера // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2015. Т. 59. № 3. С. 71–76.

22. Куликова Т.П. Зоопланктон залива Большое Онего и его продуктивность // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего. Л.: Зоол. ин-т, 1982. С. 130–155.

23. Студёнов И.И., Торцев А.М. Практическая реализация мер по сохранению водных биоресурсов на целлюлозно-бумажном производстве: результаты и их применение // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 11. С. 66–71. doi: 10.18412/1816-0395-2020-11-66-71

References

1. Surface water resources of the USSR: Hydrological knowledge. V. 3. The Northern Territory. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. 610 p. (in Russian).

2. State Water Register [Internet resource] <http://www.textual.ru> (Accessed: 19.11.2020) (in Russian).

3. Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems / Ed. V.A. Abakumov. Sankt-Peterburg: Hydrometeoizdat, 1992. 317 p. (in Russian).

4. Plotnikov G.K., Peskova T.Yu., Shkute A., Pupinya A., Pupins M. Collection of classical methods of hydrobiological researches for use in aquaculture. Daugavpils: University Academic “Saule”, 2017. 282 p. (in Russian).

5. Diatom analysis. Book 2. Definitions of fossil and modern diatoms: Orders Centrales and Mediales / Ed. A.I. Proshkina-Lavrenko. Moskva: Gosgeolizdat, 1949. 238 p. (in Russian).

6. Diatom analysis. Book 3. Definitions of fossil and modern diatoms: Order Pennales / Ed. A.I. Proshkina-Lavrenko. Moskva: Gosgeolizdat, 1950. 398 p. (in Russian).

7. Determinant of freshwater algae of the USSR. V. 2. Blue-green algae / Eds. M.M. Gollerbach, E.K. Kosinskaya, V.I. Polyansky. Moskva: Sovetskaya nauka, 1953. 651 p. (in Russian).

8. Determinant of freshwater algae of the USSR. V. 4. Diatoms / Eds. M.M. Zabelina, I.A. Kiselev, A.I. Proshkina-Lavrenko, V.S. Sheshukova. Moskva: Sovetskaya nauka, 1951. 618 p. (in Russian).

9. Crustaceans of Belarus [Internet resource] <https://crustacea-g2n.mozello.com/> (Accessed: 23.10.2019) (in Russian).

10. Determinant of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. V. 1. Zooplankton / Eds. V.R. Alekseev, S.Ya. Tsololikhin. Sankt-Peterburg: Zoologicheskii institut RAN; Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 494 p. (in Russian).

11. Manuilova E.F. Branchous crustaceans (Cladocera) of the fauna of the USSR. Moskva; Leningrad: Nauka, 1964. 327 p. (in Russian).

12. Methodological guide to the study of nutrition and food relations of fish in natural conditions / Ed. E.V. Borutsky. Moskva: Nauka, 1974. 254 p. (in Russian).

13. Loskutova O.A., Kononova O.N. Zoobenthos and zooplankton of the foothill lakes of Subpolar Urals // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-056-062

14. Vinberg G.G. Metabolic intensity of and nutritional needs of fish. Minsk: Izd-vo Belgorusskogo universiteta, 1956. 254 p. (in Russian).

15. Vinberg G.G. The Van 't-Hoff temperature coefficient and the Arrhenius equation in biology // Zhurnal obshchey biologii. 1983. V. 44. No. 1. P. 3–42 (in Russian).

16. Lazareva V.I. Zooplankton structure and dynamics in the Rybinsk reservoir. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 183 p. (in Russian).

17. Andronikova I.N. Structural and functional organization of zooplankton of lake ecosystems of different trophic types. Sankt-Peterburg: Nauka, 1996. 189 p. (in Russian).

18. Alimov A.F. Introduction to productive hydrobiology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 150 p (in Russian).

19. Kitaev S.P. Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones. Moskva: Nauka, 1984. 207 p. (in Russian).

20. Pidgayko M.L., Alexandrov B.M., Ioffe C.I., Maksimova L.P., Petrov V.V., Savateeva V.V., Salazkin A.A. Brief biological and production characteristics of reservoirs of the North-West of the USSR. V. 67. Leningrad: GosNIORKh, 1968. P. 205–228 (in Russian).

21. Buseva J.F., Pluta M.V. Feeding of yoy fish in the littoral zone of a shallow lake // Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. 2015. V. 59. No. 3. P. 71–76 (in Russian).

22. Kulikova T.P. Zooplankton of the Bolshoe Oнеgo Bay and its productivity // Limnological research on the bay of Lake Oнеga Bolshoe Oнеgo. Leningrad: Zoologicheskii institut, 1982. P. 130–155 (in Russian).

23. Studenov I.I., Tortsev A.M. Practical implementation of measures to preserve aquatic biological resources in the pulp and paper industry: results and their application // Ecology and Industry of Russia. 2020. V. 24. No. 11. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2020-11-66-71

Возможности метода биохемилюминисценции с модельной средой из сыворотки крови в оценке антиоксидантной активности растительного сырья

© 2024. В. А. Козвонин^{1,2}, к. м. н., с. н. с., доцент,
Е. В. Товстик¹, к. б. н., с. н. с., доцент, А. А. Маслова², ассистент,
Е. Б. Дунаева², к. б. н., начальник научно-инновационного отдела,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Кировский государственный медицинский университет,
610998, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,
e-mail: va_kozvonin@vyatsu.ru

Антиоксидантная активность (АОА) – важный показатель оценки растительного сырья (РС), широко применяемого в медицине для получения различных лекарственных препаратов. Использование РС на современном этапе развития фармпромышленности позволяет избежать масштабного производства синтетических лекарственных средств, сопровождающегося негативным воздействием на окружающую среду. Для объективной оценки АОА необходимо применять методы, позволяющие определить не только содержание действующего вещества, но и в целом характеризующие функциональную активность РС. В статье приведены данные по АОА водных вытяжек из листьев и плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.) и аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* L.). Определение АОА выполнено методом биохемилюминисценции (БХЛ) с использованием в качестве модельной среды (МС) сыворотки крови белых беспородных крыс. Критерием оценки служили максимальная интенсивность (I_{\max}) и светосумма свечения (S). Полученные результаты сопоставлены с данными анализа БХЛ без МС, а также с данными альтернативных методов количественного определения антиоксидантного потенциала РС (кулонометрическое титрование, прямое титрование, спектрофотометрия). По критериям оценки интенсивности свободнорадикального окисления (I_{\max}) методом БХЛ без МС было установлено, что водные вытяжки из листьев и плодов аронии черноплодной, а также листьев облепихи имеют высокий антиоксидантный потенциал (343, 274 и 268 мВ соответственно), а из плодов облепихи – более низкий. Результаты БХЛ показали, что количество радикалов в сыворотке крови при контакте с вытяжками из РС снижалось. Среди исследуемых образцов наибольшей АОА характеризовались вытяжки из плодов аронии черноплодной ($S=2006\pm 137$ мВ·с). При этом, согласно данным альтернативных методов, они занимают промежуточное положение по количественному содержанию биологически активных веществ (БАВ) с антиоксидантными свойствами. На основании слабой корреляции между данными метода БХЛ и альтернативных методов определения АОА сделано заключение о необходимости учитывать возможность непрямого зависимости между содержанием БАВ в РС и проявляемым эффектом в максимально близких к биологическим системам условиям. Измерение АОА методом БХЛ фактически является оценкой функции, а также эффективности работы БАВ и дополняет количественные методы оценки антиоксидантной активности РС.

Ключевые слова: биохемилюминисценция, сыворотка крови, арония черноплодная, облепиха крушиновидная, кулонометрическое титрование, прямое титрование, спектрофотометрия.

Possibilities of the biochemiluminescence method with a model environment from blood serum in assessing the antioxidant activity of plant materials

© 2024. V. A. Kozvonin^{1,2} ORCID: 0000-0002-2447-6949[†]
E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076[†]
A. A. Maslova² ORCID: 0009-0008-3030-2444[†]
E. B. Dunaeva² ORCID: 0000-0002-4460-0302[†]
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Kirov State Medical University,
112, K. Marksa St., Kirov, Russia, 610998,
e-mail: va_kozvonin@vyatsu.ru

Antioxidant activity (AOA) is an important indicator of the evaluation of plant raw materials (RM), which are widely used in medicine to obtain various medicines. The use of RM at the present stage of the pharmaceutical industry development allows avoiding large-scale production of synthetic medicines, accompanied by a negative impact on the environment. For an objective assessment of AOA, it is necessary to apply methods that allow determining not only the content of the active substance, but also generally characterizing the functional activity of RM. The article presents data on the AOA of aqueous extracts from the leaves and fruits of *Hippophae rhamnoides* L., *Aronia melanocarpa* L. The determination of antioxidant activity was performed by biochemiluminescence (BCHL) using serum from white mongrel rats as a model environment (ME). The evaluation criteria were the maximum intensity (I_{\max}) and the light sum of the glow (S). The results obtained were compared with the data of the analysis of BCHL without ME, as well as with the data of alternative methods for quantifying the antioxidant potential of RM (coulometric titration, direct titration, spectrophotometry). According to the criteria for assessing the intensity of free radical oxidation (I_{\max}) using the BCHL method without ME, it was found that aqueous extracts from the leaves and fruits of *A. melanocarpa*, as well as *H. rhamnoides* leaves, have a high antioxidant potential (343, 274 and 268 mV, respectively), and from *H. rhamnoides* fruits – more short. BCHL results showed that the amount of radicals in blood serum decreased upon contact with extracts from vegetable raw materials. Among the studied samples, extracts from the fruits of *A. melanocarpa* were characterized by the highest AOA ($S=2006\pm 137$ mV·s). At the same time, according to alternative methods, they occupy an intermediate position in terms of the quantitative content of biologically active substances (BAS) with antioxidant properties. Based on the weak correlation between the data of the BCHL method and alternative methods for determining AOA, it is concluded that it is necessary to take into account the possibility of an indirect relationship between the content of BAS in RM and the effect manifested in conditions as close as possible to biological systems. The measurement of AOA by the BCHL method is actually an assessment of the function, as well as the effectiveness of BAS, and complements quantitative methods for assessing the antioxidant activity of ME.

Keywords: biochemiluminescence, blood serum, *Aronia melanocarpa*, *Hippophae rhamnoides*, coulometric titration, direct titration, spectrophotometry.

Расширение спектра методов исследования биологически активных веществ (БАВ) с антиоксидантным действием направлено на выявление ценности различных видов растений в качестве сырья для фармацевтической промышленности [1]. Низкая токсичность, мягкое терапевтическое действие, отсутствие выраженных побочных эффектов и осложнений обуславливают растущую тенденцию к использованию БАВ природного происхождения в производстве лекарственных препаратов [2, 3]. С экологической точки зрения использование растительного сырья (РС) для производства лекарственных средств позволяет избежать масштабного производства синтетических фармсредств, сопровождающегося негативным воздействием на окружающую среду [4]. Значимым преимуществом фитопрепаратов является также способность к биодegradации до нетоксичных для организма и окружающей среды веществ [5].

Количественная оценка антиоксидантной активности (АОА) имеет ряд ограничений – отсутствие возможности прямого учёта связывания активных форм кислорода (АФК), образующихся в клетке; а также непосредственного химического анализа отдельных представителей АФК, например, свободных радикалов, в силу их высокой реакционной способности [6].

Доступные методы количественной оценки АОА по механизму действия, с помощью которого применяемые соединения приводят к реакции обрыва цепи, подразделяются на

две группы: перенос атома водорода и одного электрона [7]. В зависимости от способа регистрации методы разделяются на волюмометрические, фотометрические, хемилюминесцентные, флуоресцентные, электрохимические и др. [8].

Метод хемилюминесценции (ХЛ) основан на индуцировании каталитического разложения пероксида водорода ионами металлов с переменной валентностью:



Высвобождающийся при этом гидроксильный радикал ($\text{HO}\cdot$) активизирует процессы свободнорадикального окисления (СРО), которые сопровождаются химической модификацией и разрушением биомолекул [9, 10]. Реакция переноса электрона с Fe^{2+} на H_2O_2 с образованием Fe^{3+} идёт с одновременным выделением кванта света, определяемого как хемилюминесценция. Её интенсивность зависит от многих факторов и, как правило, затухает в течение 30–60 с при условии наличия антиоксидантов (АО) в исследуемой пробе. В случае работы с биологическими объектами и системами применяется термин биохемилюминесценция (БХЛ).

В настоящее время метод БХЛ редко применяется в лабораторной практике для оценки АОА [11–13]. Однако, данный метод имеет ряд преимуществ, таких как возможность применения модельных сред (МС), в частности плазмы млекопитающих, как наиболее при-

ближённной к реальным условиям функционирования антиоксидантного комплекса [10, 14] и фактически функциональной оценке работы БАВ.

Согласно ФС.2.5.0121 Государственной фармакопеи Российской Федерации XV издания (ГФ РФ XV) плоды облепихи крушиновидной (*Hippophaes rhamnoides* L.) входят в категорию лекарственного РС. Они характеризуются наличием каротиноидов и жирного масла [15]. Благодаря широкому спектру БАВ с антиоксидантным действием листья облепихи также рассматриваются в качестве перспективного лекарственного сырья [16]. Выбор облепихи в качестве объекта исследования был обусловлен её распространённостью в Кировской области, доступностью (наличием в аптечной сети, ценовой – для населения), а также высокой частотой применения данного РС в лекарственных препаратах и БАДах.

В состав аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa* L.) входят различные вещества полифенольной природы: дубильные вещества, флавоноиды, в том числе антоцианы в лейко-формах, а также аскорбиновая кислота и сапонины [17]. Данные соединения обладают противовоспалительным, кровоостанавливающим, ранозаживляющим эффектом и могут использоваться как компоненты лекарственных препаратов, в том числе трансдермальных терапевтических систем [18, 19]. Исследование АО потенциала аронии черноплодной методом БХЛ проводилось в рамках научно-исследовательской работы по разработке новых форм фитопрепаратов [18].

В медицине АО широко применяются в клинической практике, как в отдельности, так и в комбинации с другими препаратами. Широта применения делает эту группу БАВ интересной для поиска и изучения новых источников сырья.

Целью работы являлось определение антиоксидантной активности водных вытяжек из облепихи крушиновидной и аронии черноплодной методом биохимиллюминисценции для изучения возможности более широкого применения этого метода.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служило РС – плоды, листья облепихи крушиновидной и аронии черноплодной.

Пробы РС были отобраны в раннеосенний период (сентябрь) в пригородной зоне г. Ки-

рова (Кировская область, Россия). Отбирали зрелые плоды, а также листья с ненарушенной структурой. Доставленные в лабораторию образцы промывали дистиллированной водой, удаляли влагу в сушильном шкафу (ШС-80-01 СПУ, Россия) при температуре 60 °С. После сушки РС измельчали в лабораторной мельнице и пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм.

Экстракцию АО из РС осуществляли по методике, изложенной в ОФС.1.4.1.0018.15 ГФ РФ XV. Для этого порошок РС заливали дистиллированной водой (1:20) и экстрагировали на кипящей водяной бане в течение 30 мин, далее при комнатной температуре 20±2 °С – 15 мин. Полученную суспензию фильтровали через бумажный фильтр «Синяя лента» (Россия). Готовые водные вытяжки подвергали анализу различными методами.

Уровень Fe²⁺-индуцированной ХЛ определяли на биохимиллюминиметре (БХЛ-07, Россия) согласно руководству по эксплуатации прибора. Перед началом измерений БХЛ-07 прогревали не менее 20 мин, далее устанавливали в него кювету и регистрировали ХЛ образцов, наблюдая сигнал в камере в течение 30 с. Все исследования выполняли в десятикратной повторности. Критерием оценки служили максимальная интенсивность (I_{\max}) и светосумма свечения (S). Поскольку показатель I_{\max} отражает потенциальную способность биологического объекта к СРО, считали, что у образцов с более высоким значением I_{\max} свободно-радикальные процессы протекают интенсивнее. Показатель S отражает содержание радикалов RO₂, соответствующих обрыву цепи СРО (S обратно пропорционален АОА системы). Для анализа использовали базовый реакционный раствор (БРР), состоящий из 0,8 мл фосфатного буфера (20 мМ раствора дигидрофосфата калия, 105 мМ раствора хлорида калия, рН 7,4); 0,8 мл 0,05 мМ раствора сульфата железа(II); 0,4 мл свежеприготовленного 2% раствора пероксида водорода. Исходные фоновые показатели оценивали по дистиллированной воде без добавления МС (сыворотка крови, взятая у белых беспородных аутбредных крыс). Контролем служила МС, разведённая дистиллированной водой в соотношении 1:1, добавляемая в пробирку с БРР. Фоновый уровень АОА водных вытяжек из РС оценивали без добавления МС, а их АОА при смешении с МС в соотношении 1:1 (табл. 1).

Сопоставляли полученные данные с результатами альтернативных методов анализа

Таблица 1 / Table 1

Состав сред для испытаний / Composition of the test product

Название / Name	Объём, мл / Volume, mL			
	БРР BRS	H ₂ O	Сыворотка Blood serum	Вытяжка Extract
Фон, вода / Background, water	2,0	0,2	–	–
Контроль с модельной средой Control with a model environment		0,1	0,1	–
Фон, вытяжка / Background, extract		0,1	–	0,1
Опыт / Test		–	0,1	0,1

Примечание: БРР – базовый реакционный раствор; прочерк означает отсутствие компонента в составе среды.
Note: BRS – base reaction solution; a dash means the absence of a component in the environment.

АОА: кулонометрическим и прямым титрованием и спектрофотометрией. Кулонометрическое титрование осуществляли на кулонометре с бипотенциометрической индикацией точки эквивалентности (Эксперт-006, ООО «Эко-никс-эксперт», Россия). Прибор обеспечивает точное определение заряда, пошедшего на окисление и пересчёт измеренного значения в массовую концентрацию АО в среде. В качестве стандарта использовали аскорбиновую кислоту [20]. Оценку содержания АО с фотометрической регистрацией выполняли на спектрофотометре (ПЭ 5300ВИ, ООО «Экротех», Россия). Метод определения основан на окислительно-восстановительной реакции, в которой восстанавливается фосфорно-молибденовая кислота, входящая в состав реактива Фолина-Чокальтеу. Результаты выражали в эквиваленте галловой кислоты. Исследование АОА методом прямого титрования основывалось на окислении АО в кислой среде перманганатом калия. Стандартом служил кверцетин [21].

Единством альтернативных методов определения АОА служили стандарты (аскорбиновая и галловая кислота, кверцетин), которые благодаря гидроксильным группам являются сильными восстановителями и, окисляясь, производят эквивалентный аналитический сигнал.

Все манипуляции, производимые над лабораторными животными, выполнены с разрешения локального этического комитета и на основании Рекомендаций Коллегии ЕЭК от 14.11.2023 [22].

Статистическую обработку результатов измерений проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Данные выражали как среднее значение ± стандартное отклонение. Коэффициент корреляции Пирсона (r) рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel. Для создания корреляционной матрицы брали средние значения.

Результаты и обсуждение

Значения ХЛ (I_{max} и S) для фона были самыми низкими среди исследуемых проб (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Показатели оценки биохемилюминисценции
Biochemiluminiscence assessment indicators

Вариант опыта Test	Образец Sample	Условия* Conditions	Среднее значение / Average value	
			I_{max} , мВ / mV	S, мВ·с / mV·s
Фон / Background	Вода / water	1	22±3	106±32
Контроль с модельной средой Control with a model environment	Сыворотка Serum	2	837±124	4485±321
Облепиха крушиновидная <i>Hippophaes rhamnoides</i>	Листья / Leaves	1	268±29	1965±153
		2	376±25	4284±334
	Плоды / Fruit	1	1983±254	12511±830
		2	1224±144	13925±1212
Арония черноплодная <i>Aronia melanocarpa</i>	Листья / Leaves	1	343±50	2049±341
		2	650±64	4202±303
	Плоды / Fruit	1	274±19	1880±86
		2	268±48	2006±137

Примечание: * 1 – без модельной среды; 2 – с модельной средой.
Note: * 1 – without model environment; 2 – with a model environment.

Таблица 3 / Table 3

Содержание АО в водных вытяжках из растительного сырья, мг/мл
Antioxidants' content in aqueous extracts from plant raw materials, mg/mL

Метод анализа Method of analysis	Облепиха крушиновидная <i>Hippophaes rhamnoides</i>		Арония черноплодная <i>Aronia melanocarpa</i>	
	Листья Leaves	Плоды Fruit	Листья Leaves	Плоды Fruit
Кулонометрическое титрование Coulometric titration	0,0690±0,0033	0,0410±0,0023	0,0243±0,0012	0,0260±0,0013
Прямое титрование Direct titration	1,00±0,05	0,310±0,007	0,306±0,011	0,340±0,006
Спектрофотометрия Spectrophotometry	2,77±0,20	0,7022±0,0016	0,647±0,026	0,854±0,013

Примечание: в таблице приведены средние значения ± стандартные отклонения.
Note: The table shows means ± standard deviations.

Максимальная интенсивность (I_{max}) и светосумма свечения (S) МС по сравнению с фоном была выше соответственно в 38 и 42 раза.

Оцениваемые показатели ХЛ (I_{max} и S) для водных вытяжек из РС без добавления МС не имели статистически значимых различий между собой за исключением вытяжки из плодов облепихи. В этом случае регистрировали в 7 раз более высокие значения показателей I_{max} и S, чем у вытяжек из листьев облепихи, а также листьев и плодов аронии черноплодной. Более высокие значения ХЛ, регистрируемые для вытяжек из плодов облепихи, предположительно могли быть связаны с высоким содержанием в них липидов, которые являются основными мишенями активных форм кислорода и могут принимать активное участие в процессах перекисного окисления липидов (ПОЛ).

Известно, что ПОЛ может выступать в качестве основного источника спонтанной ХЛ у растений [23]. Это связано с тем, что липиды, которые содержатся в растениях, являются высоконенасыщенными, и, следовательно, очень чувствительны к окислению [24].

Полученные значения ХЛ (I_{max} и S) характеризовали вытяжки из листьев и плодов аронии, а также листьев облепихи, как имеющие самый высокий антиоксидантный потенциал и самую низкую интенсивность процессов СРО.

Показатели АОА для исследуемых вытяжек из РС достоверно отличались от МС. Однако, если для вытяжек из листьев и плодов аронии черноплодной, а также из листьев облепихи, значения показателей I_{max} и S МС были выше в 2,5–3 раза, то для вытяжек из плодов облепихи – в 2,5 раза ниже.

Сопоставление данных по исследованию ХЛ водных вытяжек из РС с МС и без неё позволило выявить, что наиболее активно процессы СРО протекают при контакте МС с вытяжками из плодов облепихи. Следует отметить, что без добавления МС количество прооксидантов в вытяжках из плодов облепихи было заведомо выше, и добавление МС способствовало снижению прооксидантной активности данной вытяжки.

Известно, что в физиологических условиях процессы ПОЛ и СРО протекают медленнее, чем при патологическом процессе, когда их интенсивность достигает максимума. При этом запускается цепная реакция, усугубляющая повреждение основных макромолекул клетки [25]. По данным БХЛ, количество радикалов в сыворотке снижалось при контакте со всеми исследуемыми вытяжками, за исключением вытяжек из плодов облепихи. В этом случае наблюдали обратное действие.

Исследование АО потенциала РС альтернативными методами позволило составить возрастающие ряды по содержанию АО в водных вытяжках из РС: листья < плоды аронии черноплодной < плоды < листья облепихи крушиновидной (кулонометрическое титрование); листья аронии черноплодной < плоды облепихи крушиновидной < плоды аронии черноплодной < листья облепихи крушиновидной (прямое титрование и спектрофотометрия) (табл. 3).

Отмечали высокую положительную корреляцию ($r=0,99$) данных, полученных методами прямого титрования и спектрофотометрии, что, возможно, связано с использованием в этих определениях стандартов фенольного типа (галловая кислота и кверцетин); а также

Таблица 4 / Table 4

Матрица коэффициентов корреляции для показателей, полученных различными методами анализа АОА / A matrix of correlation coefficients for indicators obtained by various methods of antioxidant activity analysis

Показатель / Index	1	2	3	4
1	–	0,06*	–0,37*	–0,38*
2	–0,08**	–	0,92*	0,92*
3	–0,43**	0,92**	–	0,99*
4	–0,44**	0,92**	0,99**	–

Примечание: 1 – биофлуоресценция, 2 – кулометрическое титрование, 3 – прямое титрование, 4 – спектрофотометрия, * – без модельной среды, ** – с модельной средой, прочерк означает, что показатель не рассчитывался.

Note: 1 – biochemiluminescence, 2 – coulometric titration, 3 – direct titration, 4 – spectrophotometry, * – without model environment, ** – with a model environment, a dash mean that indicator was not calculated.

кулометрического титрования с данными прямого титрования и спектрофотометрии ($r=0,92$) (табл. 4).

Между результатами определения АОА методом БХЛ и альтернативными методами анализа корреляции не было установлено ($r<0,3$).

В настоящее время проблема оценки оптимальной концентрации АО актуальна во многих отраслях промышленности и связана с тем, чтобы максимизировать их активность, а также биодоступность.

Заключение

Методы определения АО потенциала РС чаще всего основаны на количественном определении АО в субстрате. Вариативность стандартных образцов вызывает затруднения в интерпретации результатов определения АОА. Это связано с тем, что различные АО формируют различный сигнал и вступают в реакции по-разному.

Для получения более объективной оценки работы БАВ необходимо, чтобы аналитический сигнал формировался в условиях, максимально приближенных к естественным, например, при использовании метода БХЛ с МС в виде сыворотки крови животных. Выявлено, что вытяжки из листьев аронии черноплодной «гасят» процессы СРО лучше, чем вытяжки из листьев и плодов облепихи. Среди исследуемых образцов более низкими значениями I_{\max} и S характеризовались вытяжки из плодов аронии черноплодной, тогда как по данным альтернативных методов анализа они занимали промежуточное положение. В сравнении с другими исследуемыми образцами, вытяжки из плодов аронии черноплодной обладали самой мощной АО системой, позволяющей лучше остальных снижать интенсивность СРО в МС.

Таким, образом, учитывая слабую корреляцию между данными метода БХЛ и альтернативных методов определения АОА, можно сделать заключение о наличии не прямой зависимости между содержанием БАВ в РС и проявляемым эффектом в максимально близких к биологическим системам условиям. При этом измерение БХЛ фактически является оценкой функции, а также эффективности работы БАВ и дополняет количественные методы анализа.

Понимание эффективности работы антиоксидантного комплекса определённого вида растения в условиях, приближенных к *in vivo*, позволяет с большей объективностью оценивать его пригодность в качестве сырья для фармпроизводства. Исследуя АО свойства редкоиспользуемого РС методом БХЛ, можно расширить номенклатуру лекарственных средств и БАД, что, в свою очередь, снизит необходимость химического синтеза фармстанций и нагрузку на окружающую среду.

Работа выполнена в рамках финансирования по программе «Университетский научный грант» ФГБОУ ВО Кировский ГМУ Минздрава России (утверждена решением Учёного совета, протокол №11 от 23.12.2022 г.).

Литература

- Евсеева С.Б., Сысуев Б.Б. Экстракты растительного сырья как компоненты косметических и наружных лекарственных средств: ассортимент продукции, особенности получения (обзор) // Фармация и фармакология. 2016. Т. 4. № 3(16). С. 4–37. doi: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-4-37
- Джатдоева Д.Т. Комплексная оценка применения лекарственных растений в современной медицине в зависимости от биоорганических процессов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 9. С. 113–118.

3. Noor F., Tahir ul Qamar M., Ashfaq U.A., Albutti A., Alwashmi A.S.S., Aljasir M.A. Network pharmacology approach for medicinal plants: review and assessment // *Pharmaceuticals*. 2022. V. 15. No. 5. P. 572–575. doi: 10.3390/ph15050572
4. Прожерина Ю. Фармацевтические отходы как новая экологическая проблема // *Ремедиум. Журнал о российском рынке лекарств и медицинской технике*. 2017. № 11. С. 14–19. doi: 10.21518/1561-5936-2017-11-14-19
5. Osi B., Khoder M., Al-Kinani A.A., Alany R.G. Pharmaceutical, biomedical and ophthalmic applications of biodegradable polymers (BDPs): literature and patent review // *Pharm. Dev. Technol.* 2022. V. 27. No. 3. P. 341–344. doi: 10.1080/10837450.2022.2055063
6. Владимиров Ю.А., Проскурнина Е.В. Свободные радикалы и клеточная хемилюминесценция // *Успехи биологической химии*. 2009. Т. 49. С. 341–388.
7. Chaves N., Santiago A., Alias J.C. Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used // *Antioxidants (Basel)*. 2020. V. 9 (1). Article No. 76. doi: 10.3390/antiox9010076
8. Тринеева О.В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор) // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2017. № 4 (21). С. 180–197.
9. Ni C., Ji Y., Hu K., Xing K., Xu Y., Gaocorresponding Y. Effect of exercise and antioxidant supplementation on cellular lipid peroxidation in elderly individuals: Systematic review and network meta-analysis // *Front. Physiol.* 2023. Article No. 1113270. doi: 10.3389/fphys.2023.1113270
10. Ромодин Л.А. Хемилюминесценция в исследовании свободнорадикальных реакций. Часть 1 // *Acta Naturae*. 2021. Т. 13. № 3. С. 90–100. doi: 10.32607/actanaturae.10912
11. Паничкин А.В., Большакова Л.С., Миленцев В.Н., Санников Д.П., Казьмин В.М. Использование хемилюминесценции для оценки антиоксидантных свойств пищевых веществ // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10 (11). С. 2436–2439.
12. Русина И.Ф., Карташева А.Ф., Максимова Т.В., Касайкина О.Т. Анализ содержания антиоксидантов в фармпрепаратах, пищевых добавках и биосистемах методом хемилюминесценции // *Альманах клинической медицины*. 2006. № 12. С. 128.
13. Ko S.H., Choi S.W., Ye S.K., Yoo S., Kim H.S., Chung M.H. Comparison of anti-oxidant activities of seventy herbs that have been used in Korean traditional medicine // *Nutr. Res. Pract.* 2008. V. 2 (3). P. 143–151. doi: 10.4162/nrp.2008.2.3.143
14. Chanda S., Dave R. *In vitro* models for antioxidant activity evaluation and some medicinal plants possessing antioxidant properties: An overview // *Afr. J. Microbiol. Res.* 2009. V. 3 (13). P. 981–996.
15. Государственная фармакопея Российской Федерации XV издания [Электронный ресурс] <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/> (Дата обращения: 24.06.2024).
16. Jaroszevska A., Biel W. Chemical composition and antioxidant activity of leaves of mycorrhized sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) // *Chil. J. Agric. Res.* 2017. No. 12. P. 62–155. doi: 10.4067/S0718-58392017000200155
17. Пугачева О.В., Свиридова О.Л., Брежнева Т.А., Сливкин А.И. Валидация методики количественного определения дубильных веществ в листьях рябины черноплодной // *Вестник ВГУ, серия: Химия. Биология. Фармация*. 2022. № 1. С. 98–104.
18. Козвонин В.А., Товстик Е.В., Тупицын В.К., Вотинцева С.А. Применение комплекса биологически активных веществ из *Aronia melanocarpa* в парафармацевтических фитоплёнках // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. № 1. С. 97–105. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-097-105
19. Jurendić T., Ščetar M. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A review // *Antioxidants*. 2021. V. 10. No. 7. Article No. 1052. doi: 10.3390/antiox10071052
20. Фокина А.И., Фоминых Е.Г., Южанин К.И. Электрохимические методы определения аскорбиновой кислоты в биологически активных добавках // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 34–40. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-034-040
21. Олькова А.С., Товстик Е.В. Альтернативные методы оценки полезных свойств недревесной продукции леса // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16. № 1. С. 46–60. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-719
22. Рекомендация Коллегии ЕЭК от 14.11.2023 № 33 «О Руководстве по работе с лабораторными (экспериментальными) животными при проведении Доклинических (неклинических) исследований» [Электронный ресурс] <https://www.alta.ru/> (Дата обращения: 07.02.2024).
23. Naumova E.V., Vladimirov Yu.A., Belousov L.V., Tuchin V.V., Volodyaev I.V. Methods of studying ultraweak photon emission from biological objects: I. History, types and properties, fundamental and application significance // *Biophysics*. 2021. V. 66. P. 764–778. doi: 10.1134/S0006350921050158
24. Bour A., Kruglik S.G., Chabanon M., Rangamani P., Puff N., Bonneau S. Lipid unsaturation properties govern the sensitivity of membranes to photoinduced oxidative stress // *Biophys. J.* 2019. V. 116. P. 910–920. doi: 10.1101/451591
25. Узбеков М.Г. Перекисное окисление липидов и антиоксидантные системы при психических заболеваниях. Сообщение 1 // *Социальная и клиническая психиатрия*. 2014. Т. 24. № 4. С. 97–103.

References

1. Evseeva S.B., Sysuev B.B. Extracts of plant raw materials as components of cosmetic and external medicines: product range, production features (overview) // *Farmatsiya i farmakologiya*. 2016. V. 4. No. 3 (16). P. 4–37 (in Russian). doi: 10.19163/2307-9266-2016-4-3-4-37
2. Dzhatdoeva D.T. Comprehensive assessment of the use of medicinal plants in modern medicine depending on biorganic processes // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022. No. 9. P. 113–118 (in Russian).
3. Noor F., Tahir ul Qamar M., Ashfaq U.A., Albutti A., Alwashmi A.S.S., Aljasir M.A. Network pharmacology approach for medicinal plants: review and assessment // *Pharmaceuticals*. 2022. V. 15. No. 5. P. 572–575. doi: 10.3390/ph15050572
4. Prozherina Yu. Pharmaceutical waste as a new environmental problem // *Remedium. Zhurnal o rossiyskom rynke lekarstv i meditsinskoy tekhnike*. 2017. No. 11. P. 14–19 (in Russian). doi: 10.21518/1561-5936-2017-11-14-19
5. Osi B., Khoder M., Al-Kinani A.A., Alany R.G. Pharmaceutical, biomedical and ophthalmic applications of biodegradable polymers (BDPs): literature and patent review // *Pharm. Dev. Technol.* 2022. V. 27. No. 3. P. 341–344. doi: 10.1080/10837450.2022.2055063
6. Vladimirov Yu.A., Proskurnina E.V. Free radicals and cellular chemiluminescence // *Uspekhi biologicheskoy khimii*. 2009. V. 49. P. 341–388 (in Russian).
7. Chaves N., Santiago A., Alías J.C. Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used // *Antioxidants (Basel)*. 2020. V. 9 (1). Article No. 76. doi: 10.3390/antiox9010076
8. Trineeva O.V. Methods for determining the antioxidant activity of objects of plant and synthetic origin in pharmacy (review) // *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*. 2017. No. 4 (21). P. 180–197 (in Russian).
9. Ni C., Ji Y., Hu K., Xing K., Xu Y., Gaocorresponding Y. Effect of exercise and antioxidant supplementation on cellular lipid peroxidation in elderly individuals: Systematic review and network meta-analysis // *Front. Physiol.* 2023. Article No. 1113270. doi: 10.3389/fphys.2023.1113270
10. Romodin L.A. Chemiluminescence in the study of free radical reactions. Part 1 // *Acta Naturae*. 2021. V. 13. No. 3. P. 90–100. doi: 10.32607/actanaturae.10912
11. Panichkin A.V., Bolshakova L.S., Milentev V.N., Sannikov D.P., Kazmin V.M. The use of chemiluminescence to evaluate the antioxidant properties of food substances // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2013. No. 10 (11). P. 2436–2439 (in Russian).
12. Rusina I.F., Kartasheva A.F., Maksimova T.V., Kasaykina O.T. Analysis of the antioxidant content in pharmaceuticals, food additives and biosystems by chemiluminescence // *Almanakh klinicheskoy meditsiny*. 2006. No. 12. P. 128 (in Russian).
13. Ko S.H., Choi S.W., Ye S.K., Yoo S., Kim H.S., Chung M.H. Comparison of anti-oxidant activities of seventy herbs that have been used in Korean traditional medicine // *Nutrition Research and Practice*. 2008. V. 2 (3). P. 143–151. doi: 10.4162/nrp.2008.2.3.143
14. Chanda S., Dave R. *In vitro* models for antioxidant activity evaluation and some medicinal plants possessing antioxidant properties: An overview // *Afr. J. Microbiol. Res.* 2009. V. 3 (13). P. 981–996.
15. Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii XV izdaniya [Internet resource] <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15/> (Accessed: 24.06.2024).
16. Jaroszevska A., Biel W. Chemical composition and antioxidant activity of leaves of mycorrhized sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) // *Chil. J. Agric. Res.* 2017. No. 12. P. 62–155. doi: 10.4067/S0718-58392017000200155
17. Pugacheva O.V., Sviridova O.L., Brezhneva T.A., Slivkin A.I. Validation of a method for the quantification of tannins in black chokeberry leaves // *Vestnik VGU, seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*. 2022. No. 1. P. 98–104 (in Russian).
18. Kozvonin V.A., Tovstik E.V., Tupitsyn V.K., Votintseva S.A. Application of a complex of biologically active substances of *Aronia melanocarpa* in parapharmaceutical phytofilms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 1. P. 97–105 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-097-105
19. Jurendić T., Ščetar M. *Aronia melanocarpa* products and by-products for health and nutrition: A review // *Antioxidants*. 2021. V. 10. No. 7. Article No. 1052. doi: 10.3390/antiox10071052
20. Fokina A.I., Fominykh E.G., Yuzhanin K.I. Electrochemical methods for the determination of ascorbic acid in biologically active additives // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-034-040
21. Olkova A.S., Tovstik E.V. Alternative methods for assessing useful properties of non-wood forest products // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. V. 16. No. 1. P. 46–60 (in Russian). doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-719
22. Rekomendatsiya Kollegii EEK ot 14.11.2023 No. 33 “O Rukovodstve po rabote s laboratornymi (eksperimentalnymi) zhivotnymi pri provedenii Doklinicheskikh (neklini-cheskikh) issledovaniy” [Internet resource] <https://www.alt.ru> (Accessed: 07.02.2024).
23. Naumova E.V., Vladimirov Yu.A., Belousov L.V., Tuchin V.V., Volodyaev I.V. Methods of studying ultraweak photon emission from biological objects: I. History, types and properties, fundamental and application significance // *Biophysics*. 2021. V. 66. P. 764–778. doi: 10.1134/S0006350921050158
24. Bour A., Kruglik S.G., Chabanon M., Rangamani P., Puff N., Bonneau S. Lipid unsaturation properties govern the sensitivity of membranes to photoinduced oxidative stress // *Biophys. J.* 2019. V. 116. P. 910–920. doi: 10.1101/451591
25. Uzbekov M.G. Lipid peroxidation and antioxidant systems in mental disorders. Part 1 // *Sotsialnaya i klinicheskaya psixiatriya*. 2014. V. 24. No. 4. P. 97–103 (in Russian).

Применение моделей адсорбции при исследовании поглощения ионов никеля почвой

© 2024. М. А. Шумилова, к. х. н., в. н. с.,
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, Россия, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34,
e-mail: shumilovama@udman.ru

Проведена аппроксимация моделями адсорбции экспериментальных изотерм поглощения ионов никеля наиболее распространёнными типами почв Удмуртской Республики. Согласно модели Лэнгмюра, наибольшей поглотительной способностью по отношению к ионам никеля обладает дерново-подзолистая почва, наименьшей – серая лесная, дерново-карбонатная характеризуется средней способностью. Отрицательная величина энергии Гиббса указывает на самопроизвольный процесс поглощения ионов металла почвенным поглощающим комплексом (ППК). В соответствии с моделью Фрейндлиха у всех типов исследуемых почв энергия связи ион никеля – ППК уменьшается по мере заполнения поверхности, при этом исследуемые почвы характеризуются неоднородностью сорбционных центров. Модель Тёмкина является наименее репрезентативной при описании равновесия сорбции ионов никеля ППК, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия между адсорбированными частицами и энергетической гетерогенности адсорбционных центров. Обработка изотерм сорбции по модели Дубинина – Радушкевича свидетельствует о химической природе связи между поллютантом и ППК, причём практически одинаковой величиной средней свободной энергии адсорбции серой лесной и дерново-карбонатной почв и несколько меньшей у дерново-подзолистой почвы.

Ключевые слова: ионы никеля, почва, изотермы адсорбции, модель Лэнгмюра, модель Фрейндлиха, модель Тёмкина, модель Дубинина – Радушкевича.

Application of adsorption models in the study of nickel ion absorption by soil

© 2024. M. A. Shumilova ORCID: 0000-0001-5582-0258
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
34, T. Baramzinoy St., Izhevsk, Russia, 426067,
e-mail: shumilovama@udman.ru

The aim of the presented work is to study the absorption of nickel ions by soils of the Udmurt Republic using four sorption models. Humus horizons (0–20 cm) of Albeluvisols Umbric, Leptosols Rendzinic and Phaeozems Albic soils widely distributed in Udmurtia were selected as objects of nickel adsorption research. According to the Langmuir model, good sorbents are characterized by high A_{\max} values and low K_L , therefore, the best sorbent of nickel ions is Albeluvisols Umbric ($A_{\max}=0.0562$ mol/kg, $K_L=2075.19$ dm³/mol), and a weaker absorber is Phaeozems Albic ($A_{\max}=0.0192$ mol/kg, $K_L=19474.48$ dm³/mol), Leptosols Rendzinic occupies an intermediate position ($A_{\max}=0.0289$ mol/kg, $K_L=14766.47$ dm³/mol). The negative value of the Gibbs energy ($\Delta G=-17.97$ kJ/mol for Albeluvisols Umbric, -22.59 kJ/mol for Leptosols Rendzinic and -23.24 kJ/mol for Phaeozems Albic) indicates the spontaneous nickel adsorption by soil absorbing complex (SAC). In accordance with the Freundlich model, in all types of studied soils, the nickel ion – SAC binding energy decreases as the surface is filled, herewith the studied soils are characterized by heterogeneity of sorption centers. The approximation coefficient of the Temkin model is in the range of 0.80–0.85, therefore, the discrepancy between the experimental data of the theoretical model indicates the absence of interaction between the adsorbed particles. The Dubinin – Radushkevich model allows us to determine the nature of adsorption forces, as well as the value of the average free energy of adsorption: $E=8,325$ kJ/mol in Albeluvisols Umbric, $9,5477$ kJ/mol in Leptosols Rendzinic and $9,6296$ kJ/mol in Phaeozems Albic. Consequently, chemisorption is characteristic of all soils, and proceeds by an ion-exchange mechanism.

Keywords: nickel ions, soil, adsorption isotherms, Langmuir model, Freundlich model, Temkin model, Dubinin – Radushkevich model.

За последние десятилетия рост промышленной деятельности привёл к ухудшению состояния некоторых экосистем, вызывая необходимость соблюдения положений, касающихся выбросов загрязняющих веществ различными техногенными источниками. Уравнение адсорбции адекватно описывает поведение поллютантов в почвах, что позволяет контролировать процессы загрязнения почвенного покрова [1, 2].

Известно, что никель относится к числу наиболее распространённых тяжёлых металлов, загрязняющих биосферу [3], при этом исследование его поглощения почвами Удмуртской Республики с использованием различных сорбционных моделей практически отсутствует.

Целью представленной работы является изучение адсорбции никеля почвами с помощью моделей адсорбции, что позволит оптимизировать мероприятия по предотвращению распространения ионов металла в природных средах с учётом особенностей его поведения в гумусированном слое почвы.

Материалы и методика исследования

В качестве объектов исследования адсорбции никеля выбраны гумусовые горизонты (0–20 см) дерново-сильнопodzолистой слабосмытой, дерново-карбонатной выщелоченной слабосмытой и серой лесной оподзоленной почв, широко распространённых в Удмуртии [4]. Все почвы обладают тяжело-суглинистым гранулометрическим составом, сформировались на покровных суглинках, дерново-карбонатная почва – при близком подстилании покровных отложений пермскими глинами. Образцы отобраны на участках,

не подверженных техногенному воздействию. Отбор и определение физико-химических свойств почв проводили по стандартным методам (ГОСТ 17.4.3.01-83 и ГОСТ 28168-89, [5]). Значение рН почвенных фильтратов устанавливали прямой потенциометрией на иономере И-160 МИ; точность определения не превышает 0,1%. Концентрацию кислоторастворимых форм ионов металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на приборе «Shimadzu-AA7000» по стандартной методике М-02-902-125-2005. Все экспериментальные показатели получены в трёх аналитических повторностях; опыт проводился в двух биологических параллелях; приведённые данные являются их средними величинами, относительное значение стандартного отклонения находится в пределах 6,0%. Реактивы, используемые для спектрального анализа, имели квалификацию «о.с.ч.». Физико-химические свойства почв представлены в таблице 1.

Дерново-подзолистая и серая лесная почвы слабокислые, дерново-карбонатная – близкая к нейтральным, они существенно отличаются по содержанию гумуса (табл. 1), что соответствует их типовым различиям. Однако сопутствующие процессы почвообразования (выщелачивание в дерново-карбонатных почвах, оподзоливание – в серых лесных, а также смытость верхних горизонтов почв и общность почвообразующих пород) обуславливают довольно близкие значения рН и содержания металлов, влияющих на сорбционные свойства почв.

Исходный ~0,1М раствор никеля готовили растворением навески кристаллогидрата NiSO₄·7H₂O квалификации «ч.д.а.», точную концентрацию раствора устанавливали спектрометрически.

Таблица 1 / Table 1

Физико-химические свойства исследуемых почв / Physico-chemical parameters of soils

№ п/п	Тип почвы Soil type	Гумус, % Humus, %	рН		Содержание металла, мг/кг Metal content, mg/kg		
			H ₂ O	KCl	Mn	Fe	Al
1	Дерново-сильнопodzолистая слабосмытая Albeluvisols Umbric*	1,58±0,13	6,23	5,22	2,89	149,27	4620,40
2	Дерново-карбонатная выщелоченная слабосмытая Leptosols Rendzinic	3,28±0,05	6,63	5,57	2,10	150,56	6753,20
3	Серая лесная оподзоленная Phaeozems Albic	4,74±0,01	6,41	5,37	2,22	131,98	4175,80

Примечание: * – названия почв даны в соответствии с международной классификацией World Reference Base for Soil Resources (WRB).

Note: * – soil types are given according to World Reference Base for Soil Resources (WRB).

Таблица 2 / Table 2

Уравнения моделей адсорбции / Equations of adsorption models

Модель Model	Нелинейная форма Non-linear form	Линейная форма Linear form	График Chart	Литература Literature
Лэнгмюр Langmuir (1)	$C_{адс} = A_{max} \frac{K_L \cdot C}{1 + K_L \cdot C}$	$\frac{1}{C_{адс}} = \frac{1}{A_{max}} + \frac{1}{A_{max} \cdot K_L \cdot C}$	$\frac{1}{C_{адс}}$ от $\frac{1}{C}$	[8]
Фрейндлих Freundlich (2)	$C_{адс} = K_F \cdot C^{1/n}$	$\lg C_{адс} = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C$	$\lg C_{адс}$ от $\lg C$	[9]
Тёмкин Temkin (3)	$C_{адс} = \frac{RT}{b_{Te}} \ln(A_{Te} C)$	$C_{адс} = \frac{RT}{b_{Te}} \ln A_{Te} + \frac{RT}{b_{Te}} \ln C$	$C_{адс}$ от $\ln C$	[10]
Дубинин – Радушкевич Dubinin – Radushkevich (4)	$C_{адс} = A_{D-R} \exp(-K_{D-R} \varepsilon^2)$ $\varepsilon = RT \ln(1 + \frac{1}{c})$	$\ln C_{адс} = \ln A_{D-R} - K_{D-R} \varepsilon^2$	$\ln C_{адс}$ от ε^2	[11]

Для обеспечения сопоставимых условий взаимодействия ионов никеля с почвенным поглощающим комплексом (ППК) и минимизации влияния обменных реакций на сорбцию почвы исследования проводили на фоне 0,01М раствора CaCl₂ квалификации «ч.» с рН 6,8, при соотношении почва:раствор = 1:10. Воздушно-сухие почвенные образцы массой 18 г, измельчённые до размера частиц <0,1 мм, помещали в центрифужные колбы, к ним добавляли по 180 мл раствора с варьируемой от 0,0001 до 0,0028 М концентрацией никеля. Затем колбы с суспензиями взбалтывали два часа на ротаторе и отстаивали двое суток для установления химического равновесия, после чего пробы центрифугировали 10 мин со скоростью 2500 об./мин. В надосадочной жидкости определяли равновесную концентрацию ионов никеля. Количество поглощённых ионов металла рассчитывали по разности между исходными и равновесными концентрациями в жидкой фазе.

Результаты и обсуждение

Процесс адсорбции почвами тяжёлых металлов, в частности никеля, является сложным для описания, поскольку поглощение металла ППК может осуществляться одновременно по нескольким механизмам с преобладанием одного из них [6, 7].

Как правило, математическую корреляцию, играющую важную роль в моделировании адсорбционных систем, обычно представляют графически в виде соотношения между количеством поллютанта в твёрдой фазе и его

равновесной концентрацией в растворе. Следует отметить сложившуюся тенденцию при исследовании адсорбции загрязняющих веществ почвой, заключающуюся в изучении процесса с использованием нескольких моделей, что позволяет более объективно характеризовать явления, происходящие на границе ППК – поллютант.

Для количественного изучения адсорбционного процесса в гумусовом почвенном горизонте данные эксперимента исследовались на соответствие уравнениям двухкомпонентных сорбционных моделей: Лэнгмюра (для ограниченной адсорбции на монослое), Фрейндлиха (для неограниченной адсорбции), Тёмкина (с учётом сил взаимодействия между частицами адсорбата), а также модели Дубинина – Радушкевича (для адсорбции на тонкопористых сорбентах) (табл. 2).

В уравнениях (1–4) K_L, K_F, A_{Te}, K_{D-R} – константы адсорбции Лэнгмюра, Фрейндлиха, Тёмкина, Дубинина – Радушкевича соответственно; C_{адс} – количество компонента, адсорбированного твёрдой фазой, отнесённое к её массе (моль/кг); A_{max} – максимум адсорбции, или ёмкость монослоя Лэнгмюра, (моль/кг); C – равновесная концентрация компонента в растворе (моль/дм³); n – константа изотермы Фрейндлиха, характеризующая неоднородность поверхности; b_{Te} – константа, связанная с теплотой сорбции, (Дж/моль); A_{D-R} – теоретическая ёмкость сорбента (моль/кг); ε – потенциал Поляни; R – универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)); T – абсолютная температура, К. Определение величин констант из (1)–(4) возможно графическим

способом путём построения зависимостей их линейных форм (табл. 2), либо расчётным способом методом линейных наименьших квадратов, что и было осуществлено в нашем эксперименте. Адекватность модели оценивали по величине коэффициента аппроксимации R^2 .

Изображённые на рисунке (а) зависимости сорбции катионов никеля тремя типами почв являются графическим выражением линейаризованной формы модели Лэнгмюра. Экспериментально полученные точки хорошо укладываются в прямолинейную зависимость. Значения параметров модели представлены в таблице 3.

В общем случае хорошие сорбенты, согласно уравнению (1), характеризуются высокими значениями A_{max} и низкими $-K_L$ [12], поэтому лучшим сорбентом ионов никеля является дерново-подзолистая почва (табл. 3), а более слабым поглотителем – серая лесная, дерново-карбонатная занимает промежуточное положение. Средство между адсорбатом и адсорбентом может быть оценено по величине безразмерного коэффициента разделения R_L [13, 14], вычисленного по формуле:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}, \quad (5)$$

где C_0 – начальная концентрация ионов металла в растворе, моль/дм³. Величины коэффициента разделения (табл. 3) находятся в диапазоне от 0 до 1, что указывает на благоприятные условия сорбции. Рассчитанные значения коэффициента R_L также свидетельствуют об уменьшении сродства между ионами никеля и исследуемыми почвами в ряду: дерново-подзолистая – дерново-карбонатная – серая лесная.

Высокие значения коэффициентов аппроксимации (табл. 3) показывают, что сорбция ионов никеля исследуемыми типами

почв хорошо описывается моделью Ленгмюра, из чего следует, что сорбированные частицы взаимодействуют только с центрами сорбции ППК и не взаимодействуют друг с другом, поэтому на поверхности сорбента образуется мономолекулярный сорбционный слой. Данное положение подтверждается также и удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчётных значений A_{max} для всех исследуемых типов почв в соответствии с величиной R^2 .

Константа адсорбционного равновесия K_L характеризует энергию взаимодействия адсорбата с адсорбентом: чем сильнее это взаимодействие, тем больше величина константы равновесия. Зная константу равновесия K_L , по уравнению 6 можно определить энергию Гиббса (ΔG) процесса адсорбции:

$$\Delta G = - RT \cdot \ln K, \quad (6)$$

Отрицательная величина энергии Гиббса (табл. 3) свидетельствует о самопроизвольном характере процесса адсорбции ППК никеля. Очевидно также, что чем меньшим числом сорбционных центров обладают почвы, тем более высокой энергией связи они характеризуются (серая лесная), и наоборот: большая адсорбционная ёмкость дерново-карбонатной почвы обуславливается меньшим сродством с ионом металла, т. е. меньшей избирательностью и соответственно меньшей энергией связи.

Один из основных постулатов модели Лэнгмюра – эквипотенциальность поверхности адсорбата, однако реальная почва не обладает таким свойством.

Модель изотермы Фрейндлиха широко используется для описания адсорбции растворённого вещества из раствора поверхностью твёрдого тела, линейаризованная форма поглощения ионов никеля исследуемыми

Таблица 3 / Table 3
 Параметры изотермы адсорбции Лэнгмюра ионов никеля почвами Удмуртии
 Parameters of the Langmuir adsorption isotherm of nickel ions by Udmurtia soils

Тип почвы Soil type	A_{max} , моль/кг mol/kg	K_L , дм ³ /моль dm ³ /mol	R^2	R_L	A_{max} эксперим. моль/кг A_{max} exper. mol/kg	$-G$, кДж/моль kJ/mol
Дерново-подзолистая Albeluvisols Umbric	0,0562	2075,19	0,999	0,331	0,0550	17,97
Дерново-карбонатная Leptosols Rendzinic	0,0289	14766,47	0,978	0,115	0,0255	22,59
Серая лесная Phaeozems Albic	0,0192	19474,48	0,992	0,092	0,0188	23,24

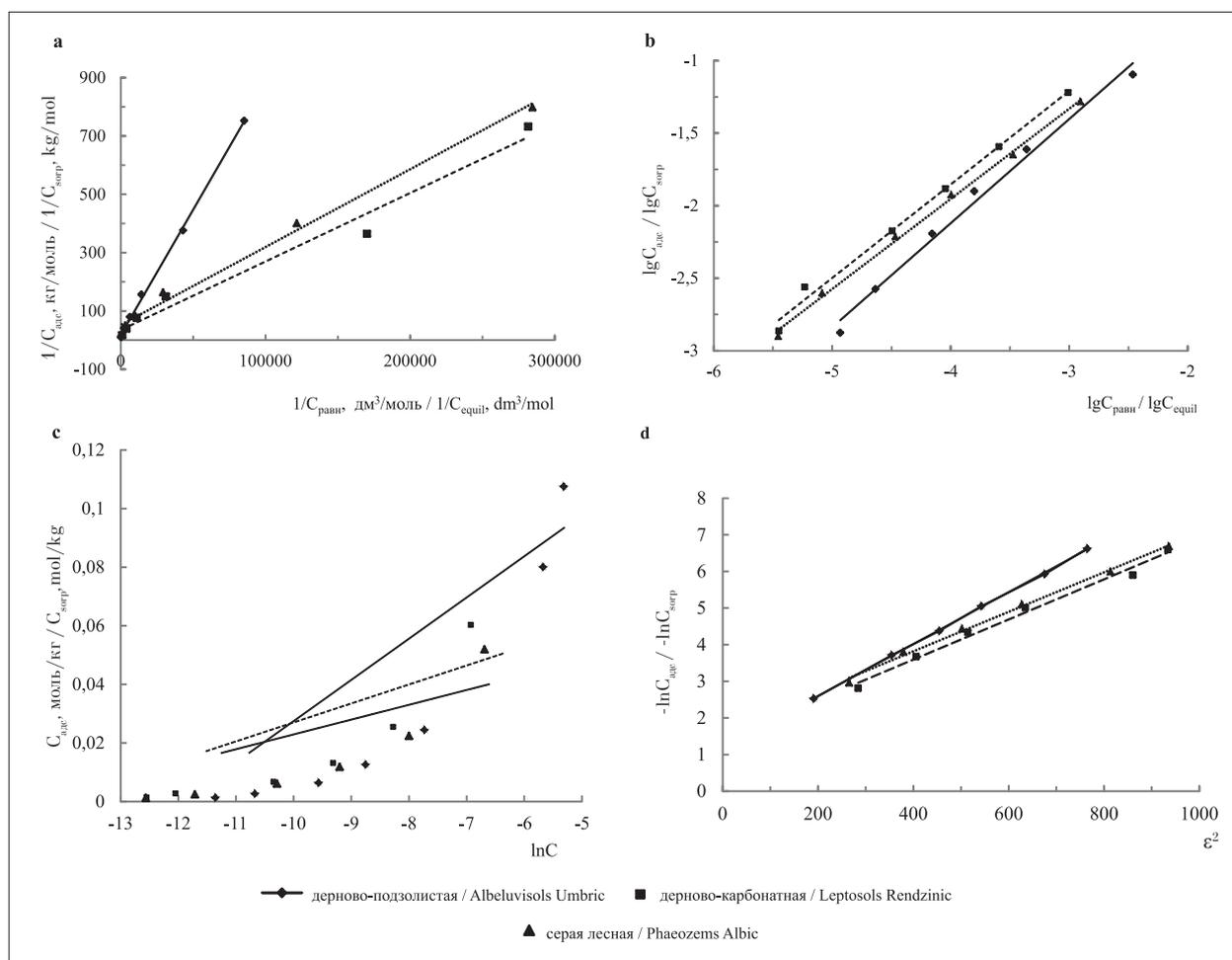


Рис. Линеаризованные изотермы адсорбции Лэнгмюра (а), Фрейндлиха (b), Тёмкина (с) и Дубинина – Радушкевича (d) ионов никеля разными типами почв
Fig. Linearized adsorption isotherms of Langmuir (a), Freundlich (b), Temkin (c) and Dubinin – Radushkevich (d) of nickel ions by by different types of soils

почвами представлена на рисунке (b). Высокие значения коэффициентов аппроксимации свидетельствуют об удовлетворительном совпадении экспериментальных данных с теоретическими положениями. Модель Фрейндлиха предполагает, что в первую очередь заполняются сорбционные центры с более сильной связывающей способностью и прочность сцепления уменьшается с увеличением степени заполнения. Для всех исследуемых нами типов почв данное утверждение правомерно, поскольку $n > 1$ (табл. 4) и энергия связи ион никеля – ППК уменьшается по мере заполнения поверхности. Значение параметра $1/n$ даёт представление о том, насколько интенсивны процессы адсорбции: поскольку найденные значения находятся в диапазоне от 0,5 до 1,0 (табл. 4), следовательно, процесс протекает довольно сложно [15]. С другой стороны, величину $1/n$ можно рассматривать как показатель неоднородности сорбционных

центров. Значение $1/n$ приближается к 0 по мере возрастания неоднородности и стремится к 1 при увеличении их однородности [16]. Анализ данных (табл. 4) свидетельствует, что исследуемые почвы характеризуются неоднородностью сорбционных центров ($1/n < 1$): наименьшим числом различных центров обладает дерново-подзолистая почва, в то время как дерново-карбонатная и серая лесная почвы характеризуются несколько большим разнообразием таких центров среди исследуемых типов почв.

Константа K_F характеризует ёмкость сорбента: чем больше её величина, тем большей адсорбционной способностью обладает вещество. Исходя из корреляции между K_F и A_{max} моделей сорбции Фрейндлиха и Лэнгмюра [17], данная модель также указывает на более высокую сорбционную способность дерново-подзолистой почвы по отношению к ионам никеля по сравнению с серой лесной почвой

и промежуточную сорбционную способность у дерново-карбонатной почвы (табл. 4).

Согласно модели Тёмкина теплота адсорбции частиц в монослое линейно снижается по мере заполнения слоя вследствие адсорбат-адсорбат межмолекулярного взаимодействия. Кроме того, данное уравнение характеризуется равномерным распределением энергии связывания частиц адсорбата с центрами адсорбции. Как видно (рис. с) экспериментально полученные точки неудовлетворительно согласуются с линеаризованной формой модели, и коэффициенты аппроксимации имеют невысокие значения. Таким образом, данная модель является наименее репрезентативной при описании равновесия сорбции ионов никеля ППК. Несоответствие экспериментальных данных теоретической модели свидетельствует об отсутствии взаимодействия между адсорбированными частицами и энергетической гетерогенности адсорбционных центров.

В последнее время к описанию сорбции различных веществ, в том числе ионов ТМ, на микропористых сорбентах, в частности, в почве, которую можно отнести к твёрдым сорбентам с развитой микропористой структурой, всё чаще подходят с позиций теории объёмного заполнения микропор (ТОЗМ), разработанной Дубининым, Радушкевичем и Астаховым [11, 18]. Обработка изотерм сорбции по модели Дубинина – Радушкевича позволяет определять природу адсорбционных сил, удерживающих частицы сорбата в порах

сорбента, по величине вычисленной средней свободной энергии адсорбции [19]. Построение изотерм сорбции в линейных координатах уравнения Дубинина-Радушкевича (рис. d) показало применимость модели (коэффициент аппроксимации ~0,99) для описания сорбции ионов Ni²⁺ из водных растворов ППК в области концентраций 1,0·10⁻⁴–2,8·10⁻³ моль/л, что позволяет определить величины констант уравнения A_{max} и k для исследуемых типов почв с достаточной точностью (табл. 5).

Максимумы адсорбции, определённые с помощью данной модели, для исследуемых типов почв полностью согласуются с полученными закономерностями классических моделей адсорбции: наибольшее значение – в дерново-подзолистой почве, наименьшее – в серой лесной, промежуточное значение в дерново-карбонатной почве. Согласно полученным данным для всех почв (табл. 5) имеет место хемосорбция, поскольку 8 < E < 16 кДж/моль [20] и процесс протекает по ионообменному механизму, причём у серой лесной и дерново-карбонатной почв практически с одинаковой величиной средней свободной энергии адсорбции, в то время как дерново-подзолистая имеет несколько меньшее значение этого показателя.

Для объективной оценки влияния некоторых почвенных параметров на процесс поглощения почвами ионов никеля были рассчитаны коэффициенты корреляции между величиной максимальной адсорбции A_{max}, энергией связи E и энергией Гиббса ΔG и не-

Таблица 4 / Table 4

Константы уравнений изотерм сорбции почвами Удмуртии ионов никеля
Constants of equation of sorption isotherms of nickel ions by Udmurtia soils

Тип почвы Soil type	Уравнение Фрейндлиха the Freundlich equation				Уравнение Тёмкина the Temkin equation		
	K _F , дм ³ /моль dm ³ /mol	n	1/n	R ²	A _{T0} , дм ³ /моль dm ³ /mol	b _{T0} , кДж/моль kJ/mol	R ²
Дерново-подзолистая Albeluvisols Umbric	4,915	1,420	0,704	0,992	33702,2	144,303	0,859
Дерново-карбонатная Leptosols Rendzinic	4,040	1,619	0,618	0,996	147582	265,925	0,794
Серая лесная Phaeozems Albic	3,398	1,610	0,621	0,997	133642	313,869	0,807

Таблица 5 / Table 5

Параметры модели Дубинина – Радушкевича / Parameters of the Dubinin – Radushkevich model

Тип почвы / Soil type	A _{max} , моль/кг mol/kg	k, моль ² /кДж mol ² /kJ	R ²	E, кДж/моль kJ/mol
Дерново-подзолистая / Albeluvisols Umbric	0,3311	0,0072	0,999	8,33
Дерново-карбонатная / Leptosols Rendzinic	0,2461	0,0055	0,989	9,55
Серая лесная / Phaeozems Albic	0,1888	0,0054	0,996	9,63

Таблица 6 / Table 6

Корреляция параметров адсорбции никеля с некоторыми свойствами почв
Correlation of nickel adsorption parameters with some soil properties

Параметр адсорбции Adsorption parameter	Гумус, % Humus, %	pH	Mn	Fe	Al
Величина максимальной адсорбции, A_{\max} Maximum adsorption value, A_{\max}	+0,934	-0,882	+0,922	+0,657	-0,106
Энергия связи, E / Bond energy, E	+0,912	+0,771	-0,981	-0,495	+0,301
Энергия Гиббса, ΔG / Gibbs Energy, ΔG	+0,934	+0,807	-0,968	-0,544	-0,106

которыми характеристиками, определяющими сорбционную способность почв и способными влиять на эти константы (табл. 6).

В соответствии с полученными данными видно, что на величину прочности связи ионов никеля с ППК оказывают влияние ряд факторов, что отражается на знаке и величине корреляции. Анализ зависимости величины максимальной адсорбции от почвенных показателей указывает на ведущую роль гумуса, а также соединений марганца, железа и величины pH в поглощении почвой ионов никеля, что соответствует литературным данным [21]. Полученные зависимости находятся в согласии с выводами из изотерм Фрейндлиха и Дубинина – Радушкевича, что процесс адсорбции протекает достаточно сложно, как можно предположить, с участием ионообменного механизма и образованием внешнесферных комплексов. Наибольшее влияние на величину энергии связи и энергию Гиббса также оказывает содержание марганца, органических веществ и pH почвенной вытяжки.

Заключение

Проведённые в статических условиях исследования адсорбции почвой ионов никеля показали, что полученные экспериментально изотермы хорошо описываются классическими моделями адсорбции и моделью Дубинина – Радушкевича. Согласно модели Лэнгмюра, лучшим сорбентом ионов никеля является дерново-подзолистая почва, а более слабым поглотителем – серая лесная, дерново-карбонатная занимает промежуточное положение. По-видимому, это обусловлено преобладанием в дерново-подзолистой почве механизма специфической сорбции никеля полуторными оксидами в отличие от двух других типов почв, в которых преобладают ионообменные реакции (неспецифическая сорбция) на обменных позициях гумусовых кислот.

Отрицательная величина энергии Гиббса свидетельствует о самопроизвольном характере процесса адсорбции ППК никеля. В соот-

ветствии с моделью Фрейндлиха процесс поглощения ионов металла почвой протекает достаточно сложно, так как исследуемые почвы характеризуются неоднородностью сорбционных центров: наименьшим числом различных центров обладает дерново-подзолистая почва, в то время как дерново-карбонатная и серая лесная почвы характеризуются несколько большим разнообразием таких центров среди исследуемых типов почв. Модель Тёмкина является наименее репрезентативной при описании равновесия сорбции ионов никеля ППК, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия между адсорбированными частицами и энергетической гетерогенности адсорбционных центров. Согласно модели Дубинина – Радушкевича у всех почв адсорбция имеет химическую природу, у серой лесной и дерново-карбонатной почв процесс протекает практически с одинаковой величиной средней свободной энергии адсорбции, в то время как дерново-подзолистая имеет несколько меньшее значение. Наибольшее влияние на прочность фиксации ППК ионов никеля оказывают такие показатели почвы, как содержание гумуса, железа, марганца и pH.

Литература

1. Коршунова В.А., Лодыгин Е.Д., Чарыкова М.В., Чуков С.Н. Сорбционное взаимодействие ионов золота и его элементов-спутников с гуминовыми кислотами торфянисто-подзолистых почв // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 66–71. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-066-071
2. Шумилова М.А., Петров В.Г. Адсорбционные модели для описания равновесия в системе арсенит-ион – почва // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 4. С. 32–38. doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-032-038
3. Аристархов А.Н., Харитонов А.Ф. Состояние и методология прогноза загрязнения почв тяжёлыми металлами // Плодородие. 2002. № 3. С. 22–24.
4. Ковриго В.П. Почвы Удмуртской Республики. Ижевск: РИО Ижевская ГСХА, 2004. 490 с.
5. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.

6. Ramachandran V., D'Souza S.F. Adsorption of nickel by Indian soils // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2013. V. 13. No. 1. P. 165–173. doi: 10.4067/S0718-95162013005000015

7. Шумилова М.А., Петров В.Г. Исследование механизмов поглощения ионов никеля почвой Удмуртии // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 5. С. 594–601. doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/3052

8. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part 1. Solids // *J. Am. Chem. Soc.* 1916. V. 38. No. 11. P. 2221–2295. doi: 10.1021/ja02268a002

9. Freundlich H.M.F. Over the adsorption in solution // *J. Phys. Chem.* 1906. V. 57. P. 385–470.

10. Темкин М.И., Пыжёв В.А. Кинетика синтеза аммиака на промотированном железном катализаторе // *Журн. физ. химии.* 1939. Т. 13. № 7. С. 851–867.

11. Дубинин М.М., Радужкевич Л.В. К вопросу об уравнении характеристической кривой для активных углей // *Доклады АН СССР.* 1947. Т. 55. С. 331–334.

12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984. 310 с.

13. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals // *BioRes.* 2011. V. 6. No. 2. P. 2181–2287. doi: 10.15376/biores.6.2.2161-2287

14. Ghorai S., Pant K.K. Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina // *Sep. Purify. Technol.* 2005. V. 42. No. 3. P. 265–271. doi: 10.1016/j.seppur.2004.09.001

15. Халил А.С., Серпокрялов Н.С., Смоляниченко А.С., Старовойтов С.В. Математическое описание сорбции на модифицированной рисовой соломе // *Инженерный вестник Дона.* 2018. № 1 [Электронный ресурс] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (Дата обращения: 18.08.2023).

16. Соколова Т.А., Трофимов С.Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула: Гриф и К, 2009. 172 с.

17. Riffaldi R., Levi-Minzi R., Soldatini G.F. Pb adsorption by soils. II. Specific adsorption // *Water Air Soil Pollut.* 1976. V. 6. No. 1. P. 119–128. doi: 10.1007/BF00158720

18. Дубинин М.М., Заверина Е.Д., Радужкевич Л.В. Современное состояние теории объёмного заполнения микропор углеродных адсорбентов // *Журн. физ. хим.* 1991. № 1. С. 9–30.

19. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Родионова М.В., Модина Е.А. Сорбция ионов цинка продуктами, содержащими целлюлозную и белковую составляющие // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2009. Т. 52. № 3. С. 27–31.

20. Farooq U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M. Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – a review of recent literature // *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. No. 14. P. 5043–5053. doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.030

21. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

References

1. Korshunova V.A., Lodygin E.D., Charykova M.V., Chukov S.N. Sorption interaction of gold ions and its pathfinder elements with humic acids of peat-podzolic soils // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 3. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-066-071

2. Shumilova M.A., Petrov V.G. Adsorption models for describing the equilibrium in the arsenite-ion – soil system // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 4. P. 32–38 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-032-038

3. Aristarkhov A.N., Kharitonova A.F. The status and methodology of the forecast of soil contamination with heavy metals // *Plodородiye.* 2002. No. 3. P. 22–24 (in Russian).

4. Kovrigo V.P. Soils of the Udmurt Republic. Izhevsk: RIO Izhevskaya GSKhA, 2004. 490 p. (in Russian).

5. Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soil. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1970. 487 p. (in Russian).

6. Ramachandran V., D'Souza S.F. Adsorption of nickel by Indian soils // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2013. V. 13. No. 1. P. 165–173. doi: 10.4067/S0718-95162013005000015

7. Shumilova M.A., Petrov V.G. A study of the mechanisms of adsorption of nickel ions by different types of soils in Udmurtia // *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy.* 2020. V. 20. No. 5. P. 594–601 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/3052

8. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids Part 1. Solids // *J. Am. Chem. Soc.* 1916. V. 38. No. 11. P. 2221–2295. doi: 10.1021/ja02268a002

9. Freundlich H.M.F. Over the adsorption in solution // *J. Phys. Chem.* 1906. V. 57. P. 385–471.

10. Tempkin M.I., Pyzhev V.A. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst // *Zhurnal fizicheskoy khimii.* 1939. V. 13. No. 7. P. 851–867 (in Russian).

11. Dubinin M.M., Radushkevich L.V. Equation of the characteristic curve of activated charcoal // *Doklady AN SSSR.* 1947. V. 55. P. 331–334 (in Russian).

12. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. Moskva: Mir, 1984. 310 p. (in Russian).

13. Hubbe M.A., Hasan S.H., Ducoste J.J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 1. Metals // *BioRes.* 2011. V. 6. No. 2. P. 2181–2287. doi: 10.15376/biores.6.2.2161-2287

14. Ghorai S., Pant K.K. Equilibrium, kinetics and breakthrough studies for adsorption of fluoride on activated alumina // *Sep. Purify. Technol.* 2005. V. 42. No. 3. P. 265–271. doi: 10.1016/j.seppur.2004.09.001

15. Khalil A.S., Serpokrylov N.S., Smolyanichenko A.S., Starovoitov S.V. Mathematical description of sorption on modified rice straw // *Engineering Journal of Don.* 2018.

No. 1 [Internet resource] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (Accessed: 18.08.2023).

16. Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. Sorption properties of soils. Adsorption. Cation exchange. Tula: Grif and K, 2009. 172 p. (in Russian)

17. Riffaldi R., Levi-Minzi R., Soldatini G.F. Pb adsorption by soils. II. Specific adsorption // *Water Air Soil Pollut.* 1976. V. 6. No. 1. P. 119–128. doi: 10.1007/BF00158720

18. Dubinin M.M., Zaverina E.D., Radushkevich L.V. Modern state of the theory of the volume filling of micropores of carbon adsorbents // *Zhurnal fizicheskoy khimii.* 1991. No. 1. P. 9–30 (in Russian).

19. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Rodionova M.V., Modina E.A. Sorption of zinc ions by products containing cellulose and protein components // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya.* 2009. V. 52. No. 3. P. 27–31 (in Russian).

20. Farooq U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M. Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – a review of recent literature // *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. No. 14. P. 5043–5053. doi: 10.1016/j.biortech.2010.02.030

21. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).

Токсичные и биогенные элементы в органах и тканях белой куропатки (*Lagopus lagopus* L., 1758) на севере Красноярского края (обзор)

© 2024. П. В. Кочкарев¹, к. б. н., директор заповедника,
 М. А. Перевозчикова², к. в. н., с. н. с.,
 А. А. Сергеев², к. б. н., зам. директора по науке,
 В. В. Ширяев², д. б. н., в. н. с., В. Н. Пимин², к. б. н., в. н. с.,
¹ФГБУ Государственный природный биосферный заповедник
 «Центральносибирский»,
 663246, Россия, Красноярский край, 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: shiryayev49@mail.ru

Изучение содержания биогенных и токсичных микроэлементов в организме диких животных актуально для организации регионального экомониторинга, оценки состояния популяций и обеспечения безопасности мясо-дичной продукции. Исследования осуществлялись с целью определения содержания биогенных и токсических элементов в органах и тканях белой куропатки на севере Красноярского края, где предполагается различный уровень техногенного загрязнения. Методом атомно-абсорбционной спектрометрии определена концентрация железа, меди, никеля, свинца и кадмия в грудных мышцах и печени белых куропаток (*Lagopus lagopus* L.) (n=162), добытых в течение пяти охотничьих сезонов в период с 2005 по 2019 гг. Уровни свинца, кадмия и железа в тканях куропаток были достоверно выше на загрязнённых территориях, а содержание меди не различалось. Концентрации элементов в тканях печени и скелетной мускулатуре на импактных территориях высоко коррелировали друг с другом, что может быть связано с общими источниками эмиссии загрязняющих веществ. Половые различия микроэлементного состава могут определяться пространственной дифференциацией полов во время миграций, сезонными особенностями питания и спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период. В пробах печени и мышечной ткани с импактных территорий концентрация кадмия и свинца превышала существующие гигиенические параметры для пищевых продуктов, что может представлять угрозу для потребителей. Высокие уровни свинца и кадмия, вероятно, отражают повышенное содержание металлов в кормовых объектах, прежде всего побегах и почках ив, являющихся важнейшим зимним кормом белой куропатки.

Ключевые слова: белая куропатка, микроэлементы, тяжёлые металлы, загрязнение, свинец, кадмий, медь, экотоксикология, охота, мясо дичи.

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)

© 2024. 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. Shiryayev² 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: shiryayev49@mail.ru

Studying the concentration of biogenic and toxic microelements in the body tissues of wild animals is relevant for organizing regional environmental monitoring, assessing the state of populations and ensuring the safety of meat and wild products. The studies were carried out to determine the content of biogenic and toxic elements in the organs and tissues of the willow ptarmigan in the north of the Krasnoyarsk Region, Russia, where different levels of technogenic pollution

are expected. The iron, copper, nickel, lead, and cadmium content in the pectoral muscles and liver of willow ptarmigan (*Lagopus lagopus* L.) (n=162), bagged during five hunting seasons in 2005–2019, were determined using atomic absorption spectrometry. The levels of lead, cadmium and iron in the tissues were significantly higher in contaminated areas, while the copper levels did not differ. Element concentrations in liver and skeletal muscle in impact areas were highly correlated with each other. This may be related to common sources of pollutant emissions. Sex differences in micronutrient content can be determined by spatial differentiation of the sexes during migration, seasonal feeding patterns, and the specific birds' metabolism in reproductive period. Cadmium and lead content in liver and muscle tissue samples from impact areas exceeded current food hygiene standards, which may pose a threat to consumers. Probably, high levels of lead and cadmium reflect the increased content of metals in food items primarily willow sprouts and buds, which are the most important winter food for ptarmigan.

Keywords: willow ptarmigan, trace elements, heavy metals, pollution, lead, cadmium, copper, ecotoxicology, hunting, game meat.

Важнейшим условием устойчивого функционирования природных популяций любого вида считается их способность существовать в неблагоприятных условиях, включая интенсивное антропогенное воздействие [1]. Развитие промышленности и сельского хозяйства привели к загрязнению окружающей среды и попаданию токсичных элементов в компоненты биоты [2]. Тяжёлые металлы, присутствующие в окружающей среде, имеют тенденцию накапливаться в организме животных, мигрируя по пищевым цепям. Биоаккумуляция токсичных металлов вызывает ряд патологических состояний, тем самым создавая серьёзную опасность для здоровья людей и животных. С точки зрения потенциальной опасности в число загрязнителей, вызывающих наибольшую озабоченность, входят кадмий и свинец, в то время как железо и медь, являясь биогенными элементами, могут проявлять негативные эффекты как при дефиците, так и в избыточных концентрациях.

Нарастающее антропогенное воздействие играет значительную роль в судьбе популяций многих видов птиц, определяя снижение численности, продуктивности, а иногда и сокращение биоразнообразия [3–5]. Особенно это актуально для арктических широт, где экосистемы менее устойчивы и более уязвимы [6, 7], а освоение минерально-сырьевой базы происходит нарастающими темпами [8]. Химическое воздействие, хоть и не является ключевым для большинства территорий, может оказывать значимое влияние на благополучие отдельных популяций и сообществ.

Дикие животные, имеющие возможность свободно перемещаться в пространстве, нередко встречаются на территориях, подверженных химическому загрязнению [9]. В этой связи они представляют особую ценность в качестве экотоксикологических биоиндикаторов [10]. Однако данные по микроэлементам диких животных и химической загрязнённости охотничьей продукции

весьма ограничены, хотя они очень важны для мониторинга качества окружающей среды, оценки влияния токсикантов на популяции и обеспечения здоровья населения. Широкое распространение, способность создавать высокие плотности и мигрировать на значительные расстояния делают белую куропатку ценным объектом экомониторинговых исследований. Эти птицы имеют большое значение для аборигенного населения Крайнего Севера, повсеместно являясь массовым объектом промысла и питания. В середине двадцатого века добыча белой и тундрной (*Lagopus muta*) куропаток (при большей численности белой куропатки) составляла от 230 до 930 тысяч особей ежегодно [11]. В условиях интенсификации освоения полярных регионов Российской Федерации значимость белой куропатки как пищевого объекта будет сохраняться. В этой связи любые новые данные о химическом составе органов и тканей белой куропатки представляют несомненный научный и практический интерес. Исследования осуществлялись с целью определения содержания биогенных и токсических элементов в органах и тканях белой куропатки на севере Красноярского края, где предполагается различный уровень техногенного загрязнения.

Объекты и методы исследований

В качестве материала для исследования использованы скелетная мускулатура и печень взрослых белых куропаток. Материал для исследований собран на территории Красноярского края РФ: на загрязнённых в результате деятельности горнодобывающих и металлургических предприятий участках в районе верхнего течения (71°06'9027 с. ш., 85°43'1391 в. д.) и устья р. Агапа (71°44'1871 с. ш., 89°17'6881 в. д.), в районе бывшего посёлка (б. п.) Ананьино (69°75'9365 с. ш., 85°67'96327 в. д.), и на фоновых территориях в окрестностях п. Новая, расположенного на одноимённой р. Новая

(71°319090 с. ш., 99°312443 в. д.). Отбор биоматериала производился в охотничий сезон в период с сентября по ноябрь. Экспериментальные данные получены в период с 2005 по 2019 гг., однако остаются актуальными, поскольку, по информации Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, за этот период характер и уровень техногенной нагрузки существенно не изменялся. Кроме того, собранные сведения могут быть использованы для сравнительных выводов при проведении экологического мониторинга территорий исследований в ближайшей и отдалённой перспективе.

Добычу белых куропаток осуществляли петлями и ружейным способом местные охотники из числа коренных и малочисленных народов Севера (КМНС). Добытые птицы ($n=162$) метились заранее изготовленной биркой, надетой на шею. Тушки замораживали в леднике при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и помещали в отдельные новые пакеты из пищевого пластика. Раз в десять дней их перевозили авиатранспортом в г. Дудинка, где в сертифицированной ветеринарной лаборатории одним из авторов производилась дальнейшая обработка материала. Тушки размораживали, вскрывали, отбирали пробы грудной мускулатуры и печени для микроэлементного анализа. Образцы внутренних органов, отобранные для спектрофотометрии, помещали в химически нейтральную упаковку (полиэтилен для пищевых продуктов) и хранили при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В лабораторных условиях образцы высушивали при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы. Для измельчения проб использовали электрические лабораторные мельницы. Для работы подбирались химически нейтральные инструменты (легированная сталь, обсидиановый нож), упаковочные материалы (полиэтилен для пищевых продуктов) и лабораторная посуда (пластик и химически нейтральное стекло). Содержание пяти микроэлементов (Fe, Cd, Pb, Cu, Ni) в мышцах груди и печени определяли в сертифицированной химической лаборатории Референтного центра УФС Россельхознадзора по Красноярскому краю (г. Красноярск) на атомно-абсорбционных спектрофотометрах Sollars (TJA Solution, США) и Varian (Agilent Technologies, США). Во всех случаях проводилось три параллельных опыта. Содержание макро- и микроэлементов определено в воздушно-сухом сырье в мг/кг (мг/кг с. в.), а также в пересчёте на натуральную влажность (мг/кг н. в.), что связано с необходимостью сопоставления данных исследований и су-

ществующих ПДК. Аналитические работы, а также пересчёт значений концентрации на натуральное вещество (н. в.) производились по общепринятым методикам [12]. Точность работы аналитической аппаратуры контролировалась специалистами Государственного комитета РФ по стандартизации, метрологии и сертификации с помощью специализированных эталонов (методические указания по поверке 5Г1.550.082 Д1, условия и периодичность согласно ГОСТ 8.002-71).

Статистическая обработка полученных данных проводилась на персональном компьютере IBM с использованием программного обеспечения MS Excel (Office 2019) и Statgraphics (19-X64) общепринятыми методами [13]. 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 [14, 15]. Для проверки достоверности различий между двумя выборками использовались критерии Стьюдента, 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

Показатели концентрации свинца, кадмия, меди, никеля и железа в печени и мышечной ткани белых куропаток на фоновых и загрязнённых территориях на севере Красноярского края представлены в таблице.

На импактных территориях концентрация свинца, кадмия и железа оказалась достоверно выше, чем на фоновом участке. Содержание загрязняющих веществ в мышцах самок на загрязнённых территориях (б. п. Ананьино, р. Верхняя Агапа, устье р. Агапа) было достоверно выше по сравнению с фоновыми (р. Новая): кадмия в среднем в 26–38 раз,

Таблица / Table

Микроэлементный состав (мг/кг н. в.) скелетной мускулатуры и печени белых куропаток фоновых и загрязнённых территорий Красноярского края / Trace element composition (mg/kg ww) of muscles and liver of willow ptarmigan on background and polluted territories of the

Пол Sex	n	Показатели Indicators	Cd	Cu	Ni	Pb	Fe
Участок у б. п. Ананьино, печень куропаток / Area near Ananino village, liver of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,52–0,74 0,61±0,07 0,62	9,2–12,20 10,38±0,87 10,50	0,28–0,48 0,38±0,069 0,40	0,31–1,74 0,58±0,55 0,34 ^A	248,00–521,00 401,00±85,77 405,00 ^A
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,42–0,95 0,66±0,15 0,64	8,50–13,50 10,95±1,69 11,25	0,33–0,43 0,37±0,03 0,37	0,18–0,37 0,28±0,06 0,26 ^A	175,00–612,00 297,00±149,67 243,50 ^A
Участок у б. п. Ананьино, мышцы куропаток / Area near Ananino village, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,45–0,95 0,68±0,17 0,67 ^C	4,40–11,20 7,48±2,28 7,85 ^{A, E}	0,25–0,64 0,41±0,12 0,41 ^F	0,42–1,15 0,69±0,21 0,64 ^{A, C, E}	65,00–180,00 134,00±34,33 134,00 ^C
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,15–0,96 0,53±0,27 0,57 ^B	5,60–18,50 10,92±3,74 10,90 ^{A, E}	0,21–0,62 0,35±0,12 0,32 ^F	0,65–1,10 0,80±0,12 0,78 ^{A, B, E}	52,00–165,00 92,80±39,97 83,00
Участок поймы на р. Верхняя Агапа, мышцы куропаток Floodplain area Verkhnyaya Agapa River, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	30	♂ min-max M±SD Med	0,08–0,84 0,47±0,23 0,56 ^{C, D}	4,10–6,50 4,94±0,79 4,80 ^{A, E}	0,12–0,32 0,17±0,03 0,18 ^F	0,16–0,35 0,26±0,06 0,27 ^{C, E, D}	85,00–185,00 127,53±22,21 126,50 ^{C, D}
Самки Females	27	♀ min-max M±SD Med	0,07–0,94 0,50±0,29 0,52 ^B	4,20–8,60 6,27±1,43 6,30 ^{A, E}	0,13–0,25 0,17±0,03 0,16 ^F	0,12–0,48 0,29±0,11 0,28 ^{B, E}	76,00–185,00 116,92±26,33 124,00 ^B
Участок поймы в устье р. Агапа, мышцы куропаток Floodplain area Agapa River mouth, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	10	♂ min-max M±SD Med	0,82–0,95 0,89±0,04 0,89 ^{A, C, D}	4,50–10,40 6,22±1,59 5,85	0,16–0,23 0,18±0,02 0,18 ^F	0,41–0,54 0,46±0,04 0,46 ^{A, C, D}	74,00–123,00 96,60±13,93 95,00 ^D
Самки Females	10	♀ min-max M±SD Med	0,65–0,95 0,78±0,10 0,76 ^{A, B}	4,50–11,60 8,01±2,89 8,10	0,14–0,22 0,18±0,02 0,18 ^F	0,42–0,68 0,54±0,09 0,54 ^{A, B}	74,00–160,00 119,20±37,57 134,50 ^B
Участок поймы р. Новая у п. Новая, мышцы куропаток Floodplain area Novaya River, muscles of willow ptarmigan							
Самцы Males	23	♂ min-max M±SD Med	0,01–0,03 0,02±0,00 0,02 ^C	3,50–10,50 6,66±1,91 6,20	–	0,01–0,06 0,02±0,01 0,02 ^C	42,00–96,00 69,86±15,14 67,00 ^C
Самки Females	22	♀ min-max M±SD Med	0,01–0,03 0,01±0,00 0,02 ^B	4,50–11,60 7,32±2,16 6,45	–	0,02–0,06 0,02±0,01 0,03 ^B	32,00–96,00 73,22±19,03 82,50 ^B

Примечание: A – различия достоверны между самцами и самками (p<0,05); B – различия достоверны между самками по сравнению с фоновой территорией, участок поймы р. Новая у п. Новая (p<0,05); C – различия достоверны между самцами по сравнению с фоновой территорией, участок поймы р. Новая у п. Новая (p<0,05); D – различия достоверны между участками поймы в устье р. Агапа и поймы р. Верхняя Агапа (p<0,05); E – различия достоверны между участком поймы р. Верхняя Агапа и участком вблизи б. п. Ананьино (p<0,05); F – различия достоверны по сравнению с участком вблизи б. п. Ананьино (p<0,05); прочерк обозначает отсутствие данных.

Note: A – the differences are significant between males and females (p<0.05); B – the differences are significant between females in comparison with the background territory, the Novaya River floodplain area near Novaya village (p<0.05); C – the differences are significant between males compared to the background territory, the Novaya River (p<0.05); D – differences are significant between the Agapa River mouth floodplain area and Verkhnyaya Agapa River floodplain area (p<0.05); E – differences are significant between Verkhnyaya Agapa River floodplain area and territory near former village of Ananyino (p<0.05); F – differences are significant compared to territory near former village of Ananyino (p<0.05); a dash indicates no data.

свинца – в 9–26 раз; железа – в 1,6 раза. У самцов концентрация кадмия выше в среднем в 28–44 раза, свинца – в 13–32 раза; железа – в 2 раза. У самцов, добытых вблизи устья р. Агапа, отмечено повышенное ($p < 0,05$) содержание в мышцах свинца, кадмия и железа по сравнению с участками в пойме р. Верхняя Агапа. Имеются достоверные отличия по содержанию никеля и меди в мышцах птиц на разных участках импактных территорий (табл.).

Посредством однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA-test) выявлено достоверное ($p = 0,00$) влияние фактора территории на содержание в тканях белой куропатки всех исследуемых элементов.

Таким образом, значения концентраций микроэлементов в мышцах и печени белых куропаток указывают, что техногенные выбросы могут рассматриваться в качестве основного источника загрязнения биоты тяжёлыми металлами на севере Красноярского края.

На различных участках выявлены достоверные ($p < 0,05$) половые различия по содержанию в печени свинца и железа; в грудных мышцах – меди, кадмия и свинца (табл.).

Анализ корреляционных связей концентрации микроэлементов в мышечной ткани установил тесную достоверную связь ($p < 0,05$) в парах: Fe-Ni (от $r = 0,72$ у самок до $r = 0,74$ у самцов); Cu-Fe (от $r = -0,95$ у самцов до $r = -0,97$ у самок), Cd-Cu ($r = 0,75$ у самок и $r = -0,86$ у самцов), Cd-Fe ($r = -0,80$ у самок и $r = 0,71$ у самцов), Cd-Ni ($r = -0,67$ у самок и $r = 0,96$ у самцов). Отмечена значимая ($p < 0,05$) положительная корреляция содержания элементов в печени и мышечной ткани: Ni у самцов ($r = 0,93$), Cd у самок ($r = 0,68$). В печени самок отмечена сильная положительная связь между кадмием и свинцом ($r = 0,96$, $p < 0,01$) и отрицательная – в парах медь-железо ($r = -0,88$, $p < 0,01$) и медь-кадмий ($r = -0,66$, $p < 0,04$). Подобные связи, вероятно, определяются общими источниками загрязнения, а также взаимодействием (конкуренцией, синергизмом) биогенных и токсичных элементов в организме.

Повышенное ($p < 0,05$) содержание свинца и железа в грудной мускулатуре по сравнению с печенью может быть связано с загрязнением раневых тканей в результате отстрела свинцовой дробью, а также их повышенной кровенаполненностью.

Значительная доля проб печени и все пробы мышечной ткани куропаток импактных участков содержали количество кадмия или свинца, превышающее предельно допустимые

концентрации для пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01, Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования ЕЭК от 28 мая 2010 г. № 299). Мясо и внутренние органы дичи, добытой на загрязнённых территориях, при употреблении в пищу могут представлять токсическую опасность для охотников и членов их семей.

Известно, что печень птиц аккумулирует свинец, никель, медь, кадмий и другие металлы, отражая уровень поступления их в организм. Индикаторная роль мышечной ткани несколько ниже, однако пищевая роль мяса определяет её значимость в экологотоксикологических исследованиях [16]. Полученные нами результаты отражают взаимосвязь содержания исследуемых элементов в организме белых куропаток и окружающей среде. Исследуемая территория расположена в зоне воздействия Норильского промышленного района, где сосредоточены крупнейшие предприятия металлургической и горнодобывающей промышленности, деятельность которых определяет до 1,9% ВВП Российской Федерации. По данным Федеральной службы государственной статистики и Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, в атмосферу г. Норильска ежегодно поступает около 2,5 млн т загрязняющих веществ, существенную долю которых составляют тяжёлые металлы [17]. При этом значительная доля поллютантов аэрогенным путём распространяется на расстояние 250–400 км от места выброса, загрязняя водные источники, донные отложения и почвы, провоцируя деградацию растительности [18–20]. Выбросы предприятий Норильского промышленного района распространяются в северном и северо-западном направлениях, особенно быстро это происходит во время зимних метелей [21–22]. Скапливаясь в понижениях рельефа, загрязнённые снежные массы определяют повышенное поступление микроэлементов в кустарники и травянистые растения в период вегетации, а также наружное загрязнение побегов и коры. Именно эти участки служат важнейшими кормовыми станциями многих фитофагов.

Воздействие химического загрязнения на диких животных на севере Красноярского края неоднократно отмечалось и ранее [23, 24]. В организме мышевидных грызунов, обитающих на территории Норильского промышленного района, происходят аномальные изменения, предполагаемой причиной которых является воздействие загрязняющих веществ [25].

Кадмий характеризуется как один из наиболее опасных металлов из-за его стойкости и токсичности [26], способности к биоаккумуляции и биомагнификации [27]. Биодоступность кадмия для растений варьирует в зависимости от физико-химической формы и свойств субстрата [28]. Кроме того, кадмий может накапливаться различными видами растений-концентраторов, например, ивами (*Salix*) [29, 30], и распространяться по пищевым цепям, попадая в организм ассоциированных фитофагов [31, 32]. Высокие уровни кадмия обнаружены у тундряной (*Lagopus muta*) и белой куропатки (*Lagopus lagopus*) [29, 33–35], что связывают в первую очередь со спецификой сезонного питания. Установлено превышение ПДК кадмия без признаков его техногенного поступления на обследованную территорию, что объясняется миграционной активностью птиц [36, 37].

По данным [38], самые высокие концентрации микроэлементов у белой куропатки обнаружены в паренхиматозных органах. В сердце и грудных мышцах концентрации низкие. Содержание кадмия в почках было приблизительно в 7–10 раз больше, чем в печени. Содержание кадмия в мышцах заметно увеличивалось, когда в почках был превышен порог 75–80 мг/кг н. в.

В Норвегии средние уровни кадмия в почках взрослых особей белой куропатки колебались от 6,6 до 48,5 мкг/г н. в., при этом отдельные концентрации достигали 71,0 мкг/г [33]. Это один из самых высоких уровней содержания кадмия, зарегистрированных у диких птиц. При этом почки взрослых куропаток содержали в 3–10 и более раз больше кадмия, чем у сеголетков. В другом норвежском исследовании было установлено, что почки и печень взрослых белых куропаток содержали в 2–5 раз больше кадмия, чем у молодых птиц [39]. Основная доля кадмия накапливалась в организме белых куропаток в течение первой зимовки, а затем, после достижения определённого порогового уровня, его аккумуляция практически прекращалась. Так, если концентрации металла в печени и почках у 2–3-месячных птиц составляла соответственно 0,11 и 0,37 мг/кг, то перезимовавшие куропатки в возрасте 10–11 месяцев имели концентрацию токсиканта 5,2 мг/кг в печени и 21,1 мг/кг – в почках, а птицы в возрасте около 2 лет имели во внутренних органах концентрацию кадмия в печени и почках соответственно 3,8 мг/кг и 22,7 мг/кг [40]. Одним из источников поступления кадмия в организм куропаток считаются

почки и побеги некоторых видов ив (*Salix* sp.), накапливающие этот металл в значительно больших количествах, чем другие кормовые растения [29]. Активное потребление ивы вызывает значительное накопление кадмия у белохвостой куропатки (*Lagopus leucurus*) в Скалистых горах Колорадо, США [41]. Взрослые глухари из Северной Норвегии, которые в основном питаются сосновыми побегами, демонстрируют значительно более низкие концентрации кадмия в почках, чем взрослые белые куропатки из того же района, избирательно питающиеся ивой [42]. В питании белой куропатки на Таймыре отмечено преобладание побегов и почек карликовой берёзы и различных видов ив, доля которых в общем объёме пищи зимой достигает 95%. В период вегетации рацион включает листья дриады (*Dryas* sp.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), багульника (*Ledum palustre*), толокнянки (*Arctostaphylos alpina*), андромеды (*Andromeda polifolia*), ягоды голубики (*Vaccinium uliginosum*), брусники, водяники (*Empetrum nigrum*) и толокнянки [43]. Ивы филиколистная (*Salix phylicifolia*), мохнатая (*S. lanata*) и прутьевидная (*S. viminalis*), являющиеся основными кормовыми объектами белой куропатки на территории исследований, могут быть основными концентраторами и источником тяжёлых металлов не только для птиц, но и для других видов, в частности, зайца-беляка [44, 45].

На севере Канады (Юкон) белые куропатки имели наибольшее содержание кадмия в мышечной мускулатуре по сравнению с другой боровой дичью, однако уровни металла не представляли опасности для здоровья потребителей [46]. В почках и печени куропаток на территории Нунавик средние концентрации кадмия составили 179,7 мкг/г с. в. и 25,8 мкг/г с. в. соответственно и были в три раза выше, чем у тундряной куропатки [36]. Авторы не предложили каких-либо ограничений в потреблении загрязнённой кадмием дичной продукции «поскольку имели недостаточно информации о потреблении почек и печени куропаток инуитами», а также не сочли возможным нарушать традиционную диету аборигенов.

Повышенный уровень кадмия в организме куропаток может нарушать жировой обмен опосредованно, влияя на выживаемость птицы во время миграции и размножения [47]. Половые различия микроэлементного состава организма белых куропаток могут определяться также спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период [48] и пространственной дифференциацией полов во время миграций. Так, на основании ана-

лиза промысловых проб из популяции белой куропатки Ямало-Ненецкого АО ($n=6475$), полученных в разные периоды миграции и в разных по широте районах, установлено, что во время зимних откочёвок птиц происходит частичное разделение их по полу. Самки первыми начинают откочёвку и мигрируют на большее расстояние [49]. Подобное явление наблюдалось в других регионах [50, 51].

В печени и почках белой куропатки в Норвегии свинец был обнаружен на всей территории страны, причём его содержание было значительно выше в южных, более обжитых регионах. Содержание меди коррелировало с химическим составом местных почв, хотя влияние металлургической промышленности также не исключалось [34, 52, 53]. Связь уровня загрязнения мышечной ткани тетеревиных птиц с территориальным фактором установлена в Якутии [54].

При обследовании костей и мышечной ткани белых куропаток, добытых охотниками в Квебеке (Канада), выявлено, что, хотя содержание свинца в костях различалось в зависимости от возраста и пола птиц, средние измеренные концентрации находились на фоновом для региона уровне (<6 мкг/г с. в.). Концентрация свинца в мышечной ткани была низкой, часто на пределе обнаружения. При этом высокие концентрации свинца в отдельных пробах, по мнению авторов исследования, были связаны с их загрязнением фрагментами свинцовой дроби в процессе отстрела, поскольку при исследовании желудков этих птиц свинцовая дробь не была обнаружена. На основании анализа риска для здоровья человека, связанного с потреблением мяса куропаток, сделан вывод, что использование свинецсодержащих боеприпасов для охоты на куриных птиц может представлять ненужный риск отравления свинцом из-за возможного проглатывания фрагментов дроби [55]. Отравление белых куропаток свинцом при заглатывании свинцовой дроби отмечено в дикой природе [39] и подтверждено экспериментально [56], однако в нашем случае каких-либо внешних признаков плумбизма [57] у добытых птиц зафиксировано не было.

Показано, что микроэлементный состав организма белой куропатки может существенно варьировать в связи с сезонной линькой, по-видимому, являющейся важным способом экстракции токсичных металлов [53, 58, 59]. Все эти данные свидетельствуют о необходимости продолжения исследований экологической

токсикологии тетеревиных птиц в различных регионах.

Заключение

На севере Красноярского края выявлены достоверные различия концентраций биогенных и токсичных элементов в печени и скелетной мускулатуре белых куропаток на фоновых территориях и участках, где отмечается промышленное загрязнение. При этом в организме птиц на загрязнённых территориях достоверно выше содержание свинца, кадмия и железа, а содержание меди не различалось.

Концентрации элементов в тканях печени и скелетной мускулатуре на импактных территориях высоко коррелировали друг с другом, что может быть связано с общими источниками эмиссии загрязняющих веществ.

Половые различия микроэлементного состава печени и мышечной ткани могут определяться пространственной дифференциацией полов во время миграций, сезонными особенностями питания и спецификой обменных процессов птиц в репродуктивный период.

В пробах печени и мышечной ткани с импактных территорий концентрация кадмия и свинца превышала существующие гигиенические параметры для пищевых продуктов, что может представлять угрозу для потребителей. Высокие уровни свинца и кадмия, вероятно, отражают повышенное содержание металлов в кормовых объектах, прежде всего побегах и почках ив, являющихся важнейшим зимним кормом белой куропатки.

Необходимо продолжить изучение влияния техногенного загрязнения территории северных регионов на гигиенические параметры мясо-дичной продукции в связи с её особой значимостью для коренных и малочисленных народов Севера.

Работа выполнена на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова» в рамках выполнения Государственного задания по Программе ФНИ государственных академий наук на 2021-2024 гг. (код темы FNWS-2022-0001).

References

1. Mukhacheva S.V. Long-term dynamics of the small mammal communities in the period of reduction

- of copper smelter emissions. 1. Composition, abundance and diversity // *Ekologiya*. 2021. No. 1. P. 66–76 (in Russian). doi: 10.31857/S0367059721010108
2. Satarug S., Boonprasert K., Gobe G.C., Ruenweera-yut R., Johnson D.W., Na-Bangchang K., Vesey D. Chronic exposure to cadmium is associated with a marked reduction in glomerular filtration rate // *Clin. Kidney J.* 2018. V. 12. No. 4. P. 468–475. doi: 10.1093/ckj/sfy113
3. Helldbjerg H., Sunde P., Fox A.D. Continuous population declines for specialist farmland birds 1987–2014 in Denmark indicates no halt in biodiversity loss in agricultural habitats // *Bird Conserv. Int.* 2018. V. 28. No. 2. P. 278–292. doi: 10.1017/S0959270916000654
4. Kamp J., Frank C., Trautmann S., Busch M., Dröschmeister R., Flade M., Gerlach B., Karthäuser J., Kunz F., Mitschke A., Schwarz J., Sudfeldt Ch. Population trends of common breeding birds in Germany 1990–2018 // *J. Ornithol.* 2021. V. 162. P. 1–15. doi: 10.1007/s10336-020-01830-4
5. Rigal S., Dakos V., Alonso H., Auniņš A., Benkő Z., Brotons L., Chodkiewicz T., Chylarecki P., de Carli E., Del Moral J.C., Domşa C., Escandell V., Fontaine B., Foppen R., Gregory R., Harris S., Herrando S., Husby M., Ieronymidou C., Jiguet F., Kennedy J., Klvaňová A., Kmecl P., Kuczyński L., Kurlavičius P., Kålås J.A., Lehikoinen A., Lindström Å., Lorrillière R., Moshøj C., Nellis R., Noble D., Eskildsen D.P., Paquet J.Y., Péliissié M., Pladevall C., Portolou D., Reif J., Schmid H., Seaman B., Szabo Z.D., Szép T., Florenzano G.T., Teufelbauer N., Trautmann S., van Turnhout C., Vermouzek Z., Vikstrøm T., Voříšek P., Weiserbs A., Devictor V. Farmland practices are driving bird population decline across Europe // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2023. V. 120. No. 21. Article No. e2216573120. doi: 10.1073/pnas.2216573120
6. Rosenberg K.V., Dokter A.M., Blancher P.J., Sauer J., Smith A.C., Smith P.A., Stanton J.C., Panjabi A., Helft L., Parr M., Marra P.P. Decline of the North American avifauna // *Science*. 2019. V. 366. P. 120–124. doi: 10.1126/science.aaw1313
7. Dietz R., Letcher R.J., Desforges J.-P., Eulaers I., Sonne C., Wilson S., Andersen-Ranberg E., Basu N., Barst B.D., Bustnes J.O., Bytingsvik J., Ciesielski T.M., Drevnick P.E., Gabrielsen G.W., Haarr A., Hylland K., Jenssen B.M., Levin M., McKinney M.A., Nørregaard R.D., Pedersen K.E., Provencher J., Styriahave B., Tartu S., Aars J., Ackerman J.T., Rosing-Asvid A., Barrett R., Bignert A., Born E.W., Branigan M., Braune B., Bryan C.E., Dam M., Eagles-Smith C.A., Evans M., Evans T.J., Fisk A.T., Gamberg M., Gustavson K., Hartman C.A., Helander B., Herzog M.P., Hoekstra P.F., Houde M., Hoydal K., Jackson A.K., Kucklick J., Lie E., Loseto L., Mallory M.L., Miljeteig C., Mosbech A., Muir D.C.G., Nielsen S.T., Peacock E., Pedro S., Peterson S.H., Polder A., Rigét F.F., Roach P., Saunes H., Sinding M.-H.S., Skaare J.U., Søndergaard J., Stenson G., Stern G., Treu G., Schuur S.S., Vikingsson G. Current state of knowledge on biological effects from contaminants on arctic wildlife and fish // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 696. Article No. 133792. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133792
8. Battakhov P.P. Environmental protection during mining in the Arctic: legal aspects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 1. P. 179–185 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-179-185
9. Toman R., Massányi P. Cadmium in selected organs of fallow-deer (*Dama dama*), sheep (*Ovis aries*), brown hare (*Lepus europaeus*) and rabbit (*Oryctolagus cuniculus*) in Slovakia // *J. Environ. Sci. Health. Part A Environ. Sci. Eng. Toxicol.* 1996. V. 31. No. 5. P. 1043–1051. doi: 10.1080/10934529609376406
10. Saveljev A., Sergeyev A., Grebnev I., Chirkov S., Sotnikov V. The hunting resources of a green belt of a big city in the East of Europe: number, sanitary parameters, and possibilities of sustainable harvest // *Beiträge zur Jagd- und Wildforschung*. 2013. V. 38. P. 300–311.
11. Pavlov B.M., Yakushkin G.D. Abundance and trade of the willow *Lagopus lagopus* and rock *L. mutus* ptarmigans in the Taimyr National District // *Russkij ornitologicheskij zhurnal*. 2019. V. 28. No. 1861. P. 5827–5829 (in Russian).
12. Lebedev P.T., Usovich A.T. Methods for studying animal feed, organs and tissues. Moskva: Rossel'hozizdat, 1976. 389 p. (in Russian).
13. Ivanter E.V., Korosov A.V. Basic biometrics. Petrozavodsk: PetrGU, 2005. 104 p. (in Russian).
14. Borovikov V. Statistica: The art of data analysis on a computer. For professionals. Sankt-Peterburg: Piter, 2001. 656 p. (in Russian).
15. Rokitskiy P.F. Biological Statistic. Minsk: Vysshaya shkola, 1964. 328 p. (in Russian).
16. Potthast K. Residues in meat and meat products // *Fleischwirtsch.* 1993. V. 73. P. 432–434.
17. State report of the Ministry of Ecology and Rational Natural Resources Management of the Krasnoyarsk Region “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Region for 2022”. Krasnoyarsk: KGBU “TSRMPiOOS”, 2023. 367 p.
18. Lobkovskiy V.A., Lobkovskaya L.G. The ecological situation around the arrangement of the enterprises of the polar branch of the MMC Norilsk Nickel: current state and forecast // *Problemy regional'noj ekologii*. 2015. No. 5. P. 40–43 (in Russian).
19. Bazova M.M., Koshevoj D.V. The assessment of the current state of water quality in the Norilsk industrial region // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2017. V. 27. No. 3. P. 49–60 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60
20. May I.V., Kleyn S.V., Vekovshina S.A., Balashov S.Yu., Chetverkina K.V., Tsinker M.Yu. Health risk for the population of Norilsk due to exposure to air pollutants // *Gigiena i sanitariya*. 2021. V. 100. No. 5. P. 528–534 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-5-528-534
21. Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Snow pollution in Norilsk industrial area // *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2014. V. 21. No. 6. P. 1025–1037 (in Russian).
22. Lezhenin A.A., Raputa V.F., Yaroslavceva T.V. Numerical analysis of atmospheric circulation and pollution transport in vicinity of the Norilsk industrial region // *Optika*

- atmosfery i okeana. 2016. No. 6. P. 467–471 (in Russian). doi: 10.15372/AOO20160603
23. Skugland T., Baskin L.M., Espelien I.S., Strand U. Content of heavy and radioactive metals in the body of reindeer from different populations // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. 1997. No. 6. P. 19–24 (in Russian).
24. Ermolov Yu.V., Lebedeva M.A., Bondar M.G., Kolphashchikov L.A., Cherevko A.S., Smolencev N.B. Accumulation of chemical elements in the biochemical food chain of the Northern Norilsk plateau // Geohimiya. 2020. V. 65. No. 5. P. 499–510 (in Russian). doi: 10.31857/S0016752520040032
25. Kireeva A.V., Kolenchukova O.A., Peretyat'ko O.V., Savchenko A.P., Temerova V.L., Emel'yanov V.I. Morphological assessment of organs and tissues of small mammals living in the industrial area of Norilsk // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2023. V. 30. No. 3. P. 330–342 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20230310
26. Battaglia A., Ghidini S., Campanini G., Spaggiari R. Heavy metal contamination in little owl (*Athene noctua*) and common buzzard (*Buteo buteo*) from northern Italy // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2005. V. 60. No. 1. P. 61–66. doi: 10.1016/j.ecoenv.2003.12.019
27. Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium // Sci. Total Environ. 2008. V. 389. No. 1. P. 37–45. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.08.037
28. Efrogmson R.A., Sample B.E., Suter G.W. Bioaccumulation of inorganic chemicals from soil by plants: Spiked soils vs. field contamination or background // Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J. 2004. V. 10. No. 6. P. 1117–1127. doi: 10.1080/10807030490887177
29. Myklebust I., Nybø S., Kålås J.A., Pedersen H.C. Cadmium accumulation in willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) and rock ptarmigan (*Lagopus mutus*) in Central Norway // Sci. Total Environ. 1993. V. 134. No. 1. P. 135–139. doi: 10.1016/S0048-9697(05)80012-9
30. Simon L., Martin H.W., Adriano D.C. Chicory (*Cichorium intybus* L.) and dandelion (*Taraxacum officinale* Web.) as phytoindicators of cadmium contamination // Water Air Soil Pollut. 1996. V. 91. P. 351–362. doi: 10.1007/BF00666269
31. Hillis T.L., Parker G.H. Age and proximity to local ore-smelters as determinants of tissue metal levels in beaver (*Castor canadensis*) of the sudbury (Ontario) area // Environ. Pollut. 1993. V. 80. No. 1. P. 67–72. doi: 10.1016/0269-7491(93)90011-c
32. Nolet B.A., Dijkstra V.A.A., Heidecke D. Cadmium in beavers translocated from the Elbe River to the Rhine/Meuse estuary, and the possible effect on population growth rate // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 1994. V. 27. No. 2. P. 154–161. doi: 10.1007/BF00214257
33. 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
34. Pedersen H.C., Fosøy 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
35. Johnsen T.V., Systad G.H., Jacobsen K.O., Nygård T., Bustnes J.O. The occurrence of reindeer calves in the diet of nesting Golden Eagles in Finnmark, northern Norway // Ornithol. Monographs. 2007. V. 84. P. 112–118.
36. 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
37. Kochkarev P.V. The role of the ptarmigan (*Lagopus lagopus* Montin. 1776) caecum in the regulation process of microelement structure // Vestnik KrasGAU. 2014. No. 10. P. 122–126 (in Russian).
38. Myklebust I., Pedersen H.C. Accumulation and distribution of cadmium in willow ptarmigan // Ecotoxicol. 1999. V. 8. P. 457–465.
39. Fimreite N. Effects of lead shot ingestion in willow grouse // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1984. V. 33. No. 1. P. 121–126. doi: 10.1007/BF01625520
40. Pedersen H.C., Myklebust J. Age dependent accumulation of cadmium in norwegian willow ptarmigan (*Lagopus lagopus*) // Proceedings of the 20th Congress of the International Union of Game Biologists. Gödöllő, Hungary, August 21–26, 1991. Budapest: Nimrod and Hubertus GMBH, 1991. P. 477–482.
41. 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
42. 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. P. 1–26.
43. Pavlov B.M. About the nutrition of willow ptarmigan and rock ptarmigan in Taimyr during the snowy season // Russkij ornitologicheskij zhurnal. 2020. V. 29. No. 1874. P. 162–164 (in Russian).
44. Norris C., Norris E., Myrberget S. Food preference of captive willow grouse *Lagopus lagopus* // Fauna Norv. Ser. C Cinclus. 1979. V. 2. No. 49–52.
45. Kochkarev P.V., Koshurnikova M.A., Sergeev A.A., Shiryaev V.V. Trace elements in the meat and internal organs of the mountain hare (*Lepus timidus* L., 1758) in the North of the Krasnoyarsk Region // Food Processing: Techniques and Technology. 2023. V. 53. No. 2. P. 312–325 (in Russian). doi: 10.21603/2074-9414-2023-2-243646.
46. Braune B.M., Malone B.J. Organochlorines and trace elements in upland game birds harvested in Canada // Sci. Total Environ. 2006. V. 363. No. 1–3. P. 60–69. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.06.011
47. 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
48. Sandercock B.K., Martin K., Hannon S.J. Demographic consequences of age-structure in extreme environments: population models for arctic and alpine

ptarmigan // *Oecologia*. 2005. V. 146. No. 1. P. 13–24. doi: 10.1007/s00442-005-0174-5

49. Piminov V.N. Spatial differentiation of sexes in willow ptarmigan // *Ekologiya i resursy ohotnich'epromyslovyh ptic*. 1989. P. 60–69 (in Russian).

50. Andreev A.V. Willow ptarmigan *Lagopus lagopus* in northern Asia: population instability caused by autecological perfection // *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal*. 1999. No. 67. P. 3–18 (in Russian).

51. Hoffman R.W. White-tailed ptarmigan (*Lagopus leucura*): a technical conservation assessment. USDA Forest Service, Rocky Mountain Region. 2006. 72 p. [Internet recourse] <http://www.fs.fed.us/r2/projects/scp/assessments/whitetailedptarmigan.pdf> (Accessed: 07.04.2024).

52. 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. P. 381–388. doi: 10.1007/BF00201756

53. Pedersen H.C., Lorås A., Andersen R.A., Jensen 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

54. 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. V. 101. P. 82–87 (in Russian). doi: 10.51215/1999-3765-2020-101-82-87

55. 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

56. Gjerstad K., Hanssen I. Experimental lead poisoning in willow ptarmigan // *J. Wildl. Manage.* 1984. V. 48. No. 3. P. 1018–1022. doi: 10.2307/3801460

57. Sergeev A.A., Shiryaev V.V., Dvornikov M.G., Tetera V.A. Lead poisoning of wild animals and prospects for the use of non-toxic hunting ammunition in Russia // *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. 2020. No. 1 (53). P. 71–83 (in Russian). doi: 10.24414/1999-6837-2020-11010

58. Braune B.M., Gaskin D.E. A mercury budget for the Bonaparte's gull during autumn moult // *Ornis Scand.* 1987. V. 18. No. 4. P. 244–250. doi: 10.2307/3676891

59. Pedersen H.C., Myklebust I., Nygård T., Sæther M. Accumulation and effects of cadmium in willow ptarmigan // *NINA Oppdragsmelding*. 1992. V. 152. P. 1–27.

Опыт изучения трансформации подзолистых почв в условиях городской среды Севера

© 2024. Т. В. Прокофьева¹, к. б. н., доцент, И. Е. Смирнова¹, к. б. н., доцент,
Е. М. Лаптева², к. б. н., зав. отд. почвоведения,
Е. В. Жангуров², к. с.-х. н., с. н. с., Ю. В. Холопов², к. б. н., н. с.,
¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tatianaprokofieva@yandex.ru, lapteva@ib.komisc.ru

В статье представлены результаты исследований почв одного из средних по величине городов европейского северо-востока России – г. Сыктывкара (Россия, Республика Коми, подзона средней тайги). Рассмотрен ряд от типичной для региона подзолистой с микропрофилем подзола почвы (Albic Retisol (Loamic, Protospodic)) до различных вариантов её антропогенной трансформации в условиях городской застройки – окультуренной агродерново-подзолистой почвы (Eutric Albic Retisol (Loamic, Aric, Humic)), представленной на участке Ботанического сада, до урбодерново-подзолистой почвы (Eutric Albic Retisol (Loamic, Humic, Transporti-Novic, Thaptoaric)) и урбостратозёма (Urbic Technosol (Loamic, Eutric, Humic Transportic)), описанных в центральной части города, вошедшей в черту городской застройки в первой половине XX века. В урбодерново-подзолистой почве и урбостратозёме мощность урбогенных горизонтов составляет примерно 40 и 70 см. Показано, что первые этапы освоения территории г. Сыктывкара связаны с агровоздействием, в последующем происходит перекрытие пахотных горизонтов горизонтами городского культурного слоя. В рассмотренном ряду почв отмечено слабое подщелачивание среды, увеличение количества поглощённых оснований и общей минерализации почвенного раствора. Выявлено заметное возрастание концентрации органического углерода в современных пахотных и урбиковых горизонтах, а также мощности горизонтов в них с содержанием $C_{орг}$ более 0,6%. Обнаружены косвенные признаки изменения состава минералов железа и марганца, обусловленные увеличением pH среды, при частичном сохранении зональных тенденций почвообразования. Выявленное направление трансформации почв согласуется с ранее описанным на территории городов Европейской части России.

Ключевые слова: антропогенная эволюция почв, городские почвы, средняя тайга, антропогенная эвтрофикация почв.

The experience of studying of the Albic Retisols antropogenic evolution in the urban environment of the North

© 2024. T. V. Prokof'eva¹ ORCID: 0000-0002-7729-2684,
I. E. Smirnova¹ ORCID: 0009-0008-3226-9414, E. M. Lapteva² ORCID: 0000-0002-9396-7979,
E. V. Zhangurov² ORCID: 0000-0002-4297-7536, Yu. V. Kholopov² ORCID: 0000-0002-5725-746X,
¹Lomonosov Moscow State University,
1/12, Lenin Hills, Moscow, Russia, 119991,
²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tatianaprokofieva@yandex.ru, lapteva@ib.komisc.ru

The results of soil studies of one of the medium-sized cities of the Russian European Northeast – Syktyvkar (Russia, Komi Republic, middle taiga subzone) are presented in the article. The series from a podzolic soil with a microprofile of podzol (Albic Retisol (Loamic, Protospodic)) typical for the region to various variants of its human transformation in urban conditions – cultivated agroderново-podzolic soil (Eutric Albic Retisol (Loamic, Aric, Humic)), represented on the site of the Botanical Garden, to urboderново-podzolic soil (Eutric Albic Retisol (Loamic, Humic, Transporti-Novic, Thaptoaric)) and urbostratozem (Urbic Technosol (Loamic, Eutric, Humic Transport)) described in the central part of the

city, included in the urban development in the first half of the XX century is considered. In urbo-soil and urbanostratozem the thickness of urbogenic horizons is approximately 40 and 70 cm. It is shown the first stages of the development of the territory of Syktyvkar city are associated with the agricultural impact. Subsequently, the arable horizons overlap with the horizons of the urban cultural layer. In the considered series of soils, weak alkalization, an increase in the absorbed bases and the total mineralization of the soil solution were found. A noticeable increase in the concentration of organic carbon in modern arable and urban horizons, as well as the thickness of horizons with the organic carbon content of more than 0.6% was revealed. An indirect evidences of changes in the composition of iron and manganese minerals (due to an increase in the pH) with partial preservation of zonal soil formation trends has been found. The revealed direction of soil evolution is consistent with the one previously described in the cities of the European part of Russia.

Keywords: anthropogenic evolution of soils, urban soils, middle taiga, anthropogenic eutrophication of soils.

В настоящее время почвы городов на культурных слоях и других техногенных отложениях – обычный объект исследования почвоведов. В почвах городов отмечены такие почвообразовательные процессы, как перемещение тонкодисперсных минеральных частиц и растворённых веществ вниз по профилю; перераспределение, перемещение и сегрегация различных форм соединений железа и марганца; реже подкисление, а чаще подщелачивание почв на техногенных отложениях и погребённых под ними естественных почв; образование слабо окристаллизованных алюмосиликатов в условиях очень высоких значений pH; аккумуляция органического вещества и питательных элементов с тенденцией увеличения их запасов за счёт наличия погребённых горизонтов; формирование устойчивой почвенной структуры [1, 2]. В черте города в почвах на техногенных отложениях формируются, прежде всего, гумусово-аккумулятивные горизонты, но возможно развитие также солонцовых горизонтов, горизонтов аккумуляции гипса, карбонатов, а также горизонтов, сцементированных соединениями железа [2]. Считается, что городские почвы – это всегда относительно молодые почвы, что определяется постоянной хозяйственной деятельностью человека [2, 3]. Они менее зависимы от климатических условий региона из-за антропогенного смягчения климата и привнесения в почвообразующий субстрат компонентов, нехарактерных для природных условий [4]. В городских почвах протекают природные почвообразовательные процессы, но их сочетание может быть нехарактерным для данной природной зоны [1, 2].

В отечественном почвоведении представления об эволюции городских почв получены при исследовании почв и культурных слоёв древних русских городов, приуроченных преимущественно к плакорным позициям рельефа в подзоне южной тайги [5–7] или к условиям выраженного гидроморфизма [8, 9], в том числе в других природных зонах. Почвенный покров средних и малых городов

северо- и среднетаёжной подзоны исследован в меньшей степени.

Цель данной работы – выявить особенности и глубину трансформации профилей почв в черте г. Сыктывкара, расположенного в подзоне средней тайги с преобладанием подзолистых почв.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на территории столицы Республики Коми – г. Сыктывкара и его окрестностей в рамках подготовки и проведения VIII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева в 2020–2022 гг. (<https://ib.komisc.ru/add/conf/soil2020/>). Город Сыктывкар основан на месте поселения (погост Усть-Сысола), первые упоминания о котором относятся к 1586 г. В 1780 г. погост преобразован в уездный город Усть-Сысольск, а в 1930 г. переименован в город Сыктывкар. Расположен Сыктывкар в юго-западной части Республики Коми, в месте слияния двух рек – Вычегды и её притока р. Сысолы, к долине которого приурочен исторический центр города. В современном облике центральной части города присутствуют постройки только XX и конца XIX в.

Рассматриваемая территория полностью располагается в подзоне средней тайги. Климат умеренно-континентальный умеренно-холодный, с длительной холодной зимой, устойчивым снежным покровом и коротким прохладным летом. Сыктывкар расположен в ареале преобладания подзолистых суглинистых почв холодных с длительным сезонным промерзанием, развивающихся под пологом ельников зеленомошной группы (*Piceeta hylacomiosum*) [10].

Объектами исследования послужили почвы двух ключевых участков. Участок КУ-1 расположен на юго-западной окраине города, на территории Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорочкина (БС), участок КУ-2,

прилегающий непосредственно к комплексу зданий университета, приурочен к центральной части города, застройка которой относится к первой половине XX в. (рис. 1, см. цв. вкладку I). Участок КУ-2 прошёл несколько стадий функционального использования: одноэтажная городская застройка с огородами → обрабатываемый участок ботанического сада с плодовыми деревьями, теплицами, подсобными сооружениями → территория современного многоэтажного корпуса университета.

На участке КУ-1 исследованы профили: (1) целинной автоморфной почвы, развитой под пологом ельника зеленомошного, – подзолистая с микропрофилем подзола почва:

$$O \frac{0-2}{2} EL [e-hf] \frac{2-18}{16} EL \frac{18-38}{20}$$

$$BEL \frac{38-75}{37} BT \frac{75-120}{45} BC \frac{120-140}{20}$$

(2) агродерново-подзолистой почвы:

$$P \frac{0-40}{40} EL \frac{40-68}{28} BEL \frac{68-79}{11}$$

$$BT \frac{79-125}{46} BC \frac{125-150}{25}$$

представленной на участке плодово-ягодных культур ВС, ранее активно распаханом (рис. 2 А, В, см. цв. вкладку I). На участке КУ-2 описаны и изучены профили антропогенно-изменённых почв – урбодерново-подзолистой:

$$AYur \frac{0-6}{6} U1 \frac{6-19}{13} U2 \frac{19-28}{9} U3 \frac{28-34}{6}$$

$$TCH \frac{34-42}{8} [P] \frac{42-59}{17} [BEL] \frac{74-98}{24} [BT]$$

и урбостратозёма:

$$AYur \frac{0-3}{3} U1 \frac{3-14}{11} TCH1 \frac{14-26}{12}$$

$$TCH2 \frac{26-35}{9} U2 \frac{35-50}{15} TCH3 \frac{50-66}{16}$$

$$[P] \frac{66-92}{26} [EL] \frac{92-115}{23} [BEL]$$

формирующихся в настоящее время под травянистой рудерально-злаковой растительностью на территории одного из корпусов университета (рис. 2 С, D, см. цв. вкладку I).

Анализ морфологического строения почвенных профилей (сопоставление строения профилей и наборов горизонтов) и физико-химических свойств почв выполнен общепринятыми

в почвоведении методами. Определены электропроводность и pH водной и солевой вытяжек согласно ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85, содержания обменных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+}) по ГОСТ 26487-85, подвижных форм P_2O_5 , K_2O по ГОСТ 26207-91 и Fe_2O_3 – в 0,2 н растворе HCl, органического углерода (C_{org}) – методом Тюрина с фотометрическим окончанием (ФР.1.31.2020.38218). Гранулометрический состав (ГС) исследован методом Качинского [11], содержание карбонатов в образцах почв оценено объёмно-метрическим методом с помощью кальциметра 08.53 Eijkelaar (SA07, США-Нидерланды) (ISO 10693). Статистическая обработка данных выполнена с применением пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2010. Цвет определён при помощи цветовых шкал Манселла для почв.

При диагностике и классификации почв использованы принципы современной классификации почв России [12] и городских почв [13]. Для удобства приведены аналоги названий почв в соответствии с Международной классификацией [14].

Результаты и обсуждение

Морфологическое строение почв. Рассмотренные ключевые участки расположены на дренированных участках водоразделов, приурочены к однотипным почвообразующим породам – крупнопылеватым покровным суглинкам, перекрывающим моренные суглинистые отложения. Морфологическое описание целинной подзолистой почвы участка КУ-1 соответствует строению широко распространённых в окрестностях г. Сыктывкара подзолистых с микропрофилем подзола почв, ненасыщенных, глубокоосветлённых, пылеватолегкосуглинистых на покровных суглинках (Albic Retisol (Loamic, Protosodic)) [10, 15].

Распашка и окультуривание территории ВС (участок плодово-ягодных культур на территории КУ-1) привели к трансформации подзолистой почвы, вовлечённой в агропроизводство, и формированию в верхней части её профиля стратифицированного пахотного горизонта (P). Более значительная мощность пахотного горизонта (40 см), по сравнению с мощностью горизонтов, замещённых и трансформированных при распашке (18–20 см) (табл.), указывает на рост профиля вверх из-за привноса материала в пахотные горизонты в процессе окультуривания. Данная почва определена нами как агродерново-подзолистая глубокоосветлённая, гумусово-

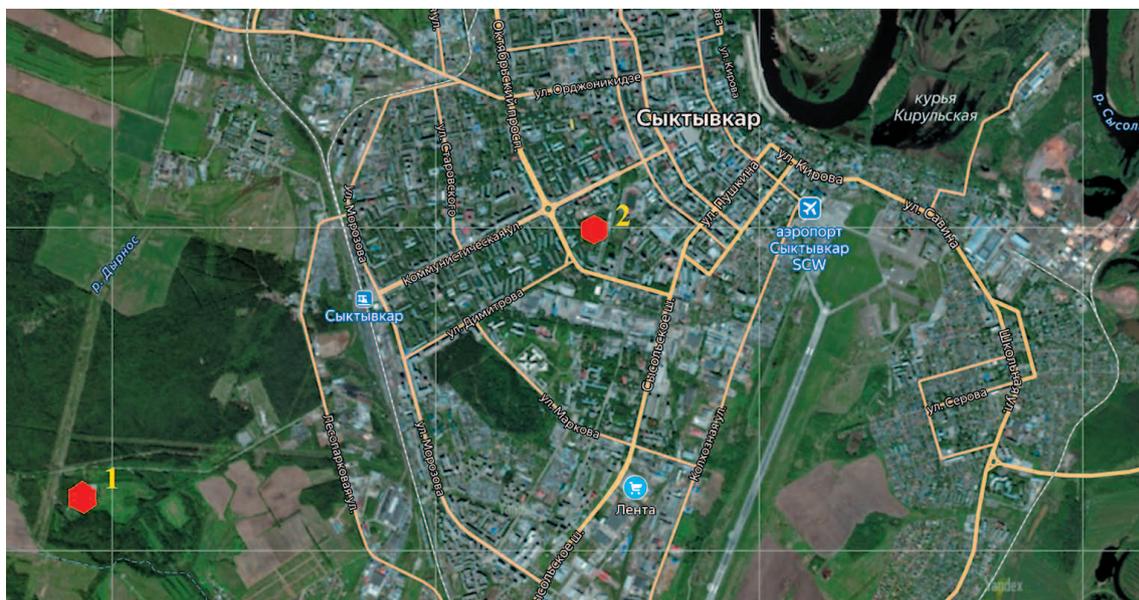


Рис. 1. Расположение ключевых участков в черте г. Сыктывкара (космический снимок получен с общедоступного электронного ресурса <https://yandex.ru/maps>): 1 – участок КУ-1 (территория Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета); 2 – участок КУ-2 в центральной части города / **Fig. 1.** Location of key sites (KS) within Syktyvkar city (satellite image obtained from a publicly available electronic resource <https://yandex.ru/maps>): 1 – KS-1 (territory of the Botanical Garden of Syktyvkar State University); 2 – KS-2 in the central part of the city

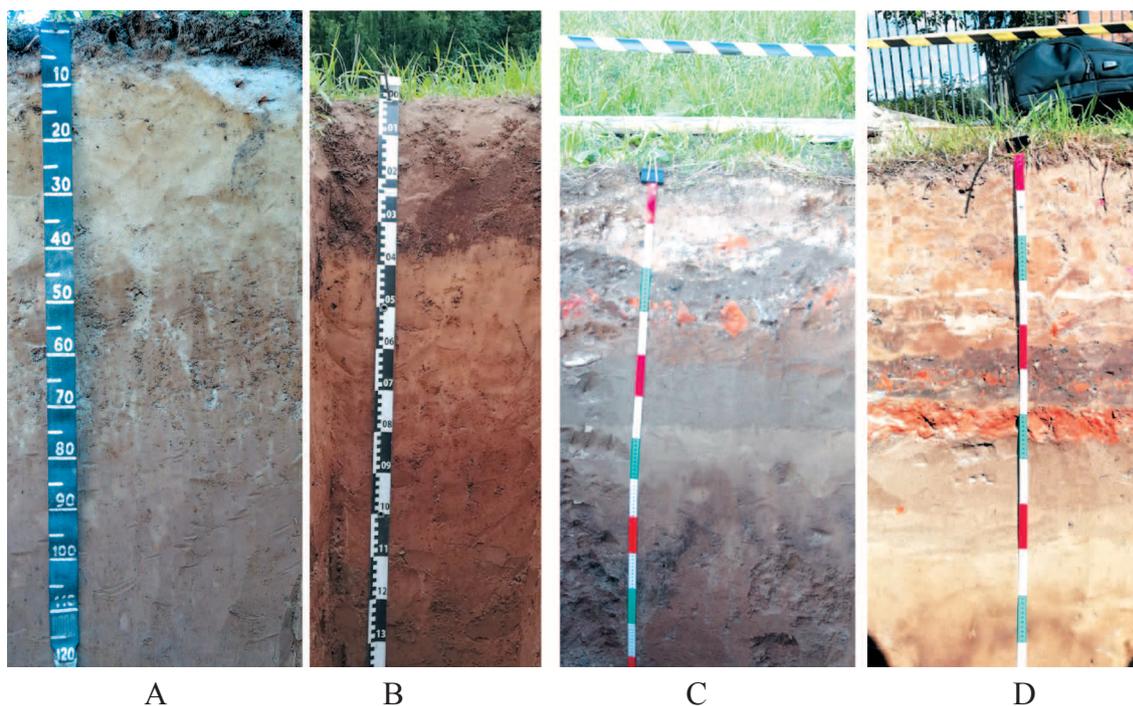


Рис. 2. Профили исследованных почв: А – подзолистая с микропрофилем подзола; В – агродерново-подзолистая; С – урбодерново-подзолистая; D – урбостратозём / **Fig. 2.** Profiles of the studied soils: A – podzolic with a microprofile of podzol (Albic Retisol (Loamic, Protosodic)); B – agroderново-podzolic (Eutric Albic Retisol (Loamic, Aric, Humic)); C – urbo-podzolic (Eutric Albic Retisol (Loamic, Humic, Transporti-Novic, Thaptoaric)); D – urbostratozem (Urbic Technosol (Loamic, Eutric, Humic Transportic))

Т. В. Прокофьева, И. Е. Смирнова, Е. М. Лаптева,
 Е. В. Жангуров, Ю. В. Холопов «Опыт изучения трансформации
 подзолистых почв в условиях городской среды Севера». С. 64.

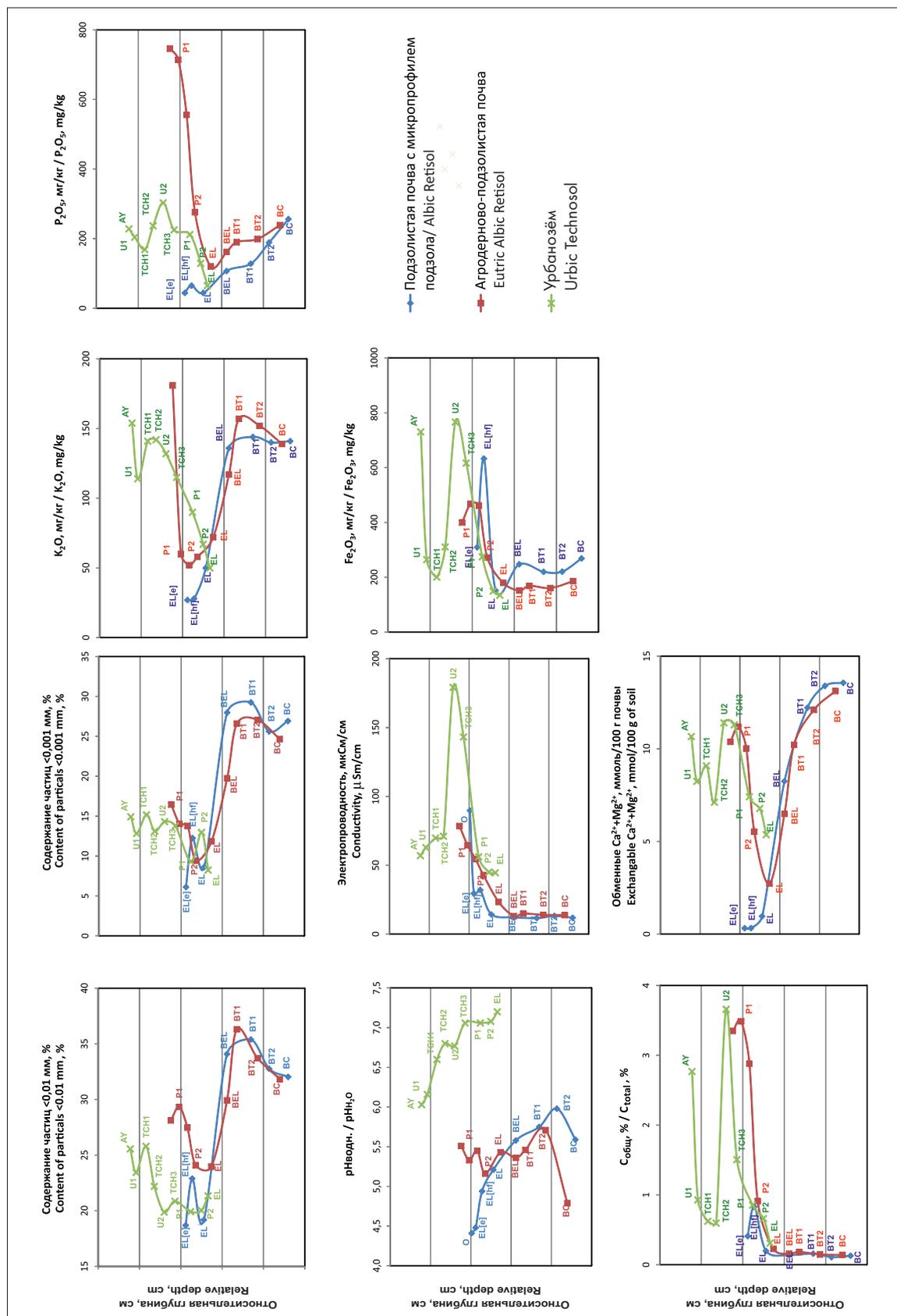


Рис. 3. Профильное изменение некоторых свойств в изученных почвах. Относительная глубина «0» соответствует верхней границе толщ природного горизонта в ненарушенном профиле целинной подзолистой почвы / Fig. 3. Profile change of some properties in the studied soils. The "0" relative depth corresponds to the upper boundary of the thickness of natural horizons in the natural podzolic soil (Albic Retisol) profile

Таблица / Table

Некоторые параметры верхних горизонтов изученных почв / Some parameters of the studied soils upper horizon

Ключевой участок Key site	Использование, почва Land use, soil	Формула профиля Profile	Мощность, см / Thickness, cm		Свойства горизонта EL / Properties of the EL horizon	pH _{воздух} , pH _{вода}	Са+Mg, ммоль/100 г почвы Ca+Mg, mmol/100 g of soil		
			агрогенных горизонтов of arable horizons	урбогенных горизонтов of urban horizons				горизонтов с C _{орг} >0,6% of horizons with C _{total} >0,6%	Цвет по шкалам Манселла Color by Munsell soil color chart
KY-1 KS-1	Лес, подзолистая с микропрофилем подзола Forest, Podzolic with a microprofile of podzol	O-EL[e]-EL[hf]-EL-BEL-BT1-BT2-BC	0	0	8	7,5YR 6-7/2-3	14,3	5,2	0,97
			40	0	40	10YR 5-6/3-4	23,4	5,4	2,70
KY-2 KS-2	Пашня, агродерново-подзолистая Arable land, agrodernovo-podzolic	P1-P2-EL-BEL-BT1-BT2-BC	17	42	59	10YR 5/4	-	-	-
			24	63	87	10YR 5/4	44,6	7,2	5,41

Примечание / Note: «-» – не определены / undetermined.

стратифицированная средне- и глубокопахотная пылевато-легкосуглинистая на покровных суглинках (Eutric Albic Retisol (Loamic, Aric, Humic)).

Анализ морфологического строения почв, вскрытых разрезами на участке КУ-2, свидетельствует о формировании в городских условиях над пахотными горизонтами толщи, состоящей из слоёв техногенных отложений (ТСН), **бесструктурных, плотных, малогумусных**, и городских гумусово-аккумулятивных урбиковых (U) горизонтов. Появление этих горизонтов в рассмотренных почвах можно отнести ко времени строительства здания университета и активного функционирования при нём ботанического сада (30–50-е гг. прошлого столетия). В горизонтах U и ТСН содержится много включений строительного и бытового мусора, присутствуют карбонатные включения, но они распространены неравномерно. В профиле урбостратозёма среднемошного пылевато-легкосуглинистого на погребённой агродерново-подзолистой почве (Urbic Technosol (Loamic, Eutric, Humic Transportic)) мощность урбогенных горизонтов составляет более 60 см. В урбодерново-подзолистой пылевато-легкосуглинистой почве (Eutric Albic Retisol (Loamic, Humic, Transportic-Novic, Thaptoaric)) **мощность урбогенных горизонтов около 40 см**, количество включений меньше и нет сплошного слоя, состоящего из них. В обоих разрезах под погребёнными пахотными горизонтами отчётливо выделяются ненарушенные нижние части элювиальных горизонтов природных подзолистых почв, послуживших основой для формирования городских почв. По наличию морфонов тёмно-коричневого цвета хорошо выделяется также диагностический горизонт BEL (рис. 2, см. цв. вкладку I). Окраска природных горизонтов имеет чуть более красноватые оттенки (в соответствии со шкалами Манселла 7,5YR), чем антропогенные горизонты (10YR). По мере увеличения степени антропогенной трансформации уменьшается светлота окраски с 6–7 в подзолистой почве до 5–6 в агро-почве и 4 в урбостратозёме.

Во всех изученных профилях обнаружены железо-марганцевые микроорштейны (примазки) при отсутствии явной глеевой окраски. Это свидетельствует об одинаковом переменном окислительно-восстановительном режиме почв на всех рассмотренных КУ.

Таким образом, изменение функционального использования земельных участков в черте города привело к формированию новых

горизонтов в почвах. Распашка и окультуривание подзолистых почв обусловили формирование пахотных горизонтов. При переходе от аграрного к городскому использованию образуется толща культурного слоя из переслаивающихся урбиковых (U) и техногенных (ТСН) горизонтов, аналогично тому, как это происходит в других городах [1, 5, 6, 8]. За примерно 100 лет с момента начала застройки центральной части г. Сыктывкара накопилось всего около 50 см отложений городского педоседимента.

Физико-химические свойства почв. Антропогенные горизонты (и пахотные, и урбогенные) содержат больше органического углерода и питательных элементов, чем горизонты природных почв, а также отличаются по содержанию некоторых гранулометрических фракций (рис. 3, см. цв. вкладку II). Так, в пахотных горизонтах отмечается некоторое утяжеление гранулометрического состава за счёт повышения содержания илистой фракции. Это, по-видимому, связано с характером материала, применявшегося для подсыпок при окультуривании почв. Напротив, в урбиковых горизонтах снижено содержание крупной пыли относительно почвы, погребённой под ними, и относительно верхних горизонтов целинной подзолистой почвы. Хотя в целом гранулометрический состав городских почв остаётся легкосуглинистым, можно отметить более грубообломочный опесчаненный характер материала из-за большого количества включений городского мусора, что в целом характерно обычно для урбогенно изменённых почв [1, 16].

Содержание $C_{орг}$ в агрогенных и урбиковых горизонтах почв Сыктывкара существенно выше, чем в целинной подзолистой почве. Оно достигает 3–4%. Мощность горизонтов, содержащих более 1% гумуса (примерно 0,6% $C_{орг}$), в рассмотренном ряду трансформации увеличивается с 8 до 87 см (табл.), несмотря на отсутствие практики массового применения компостов для улучшения почв в г. Сыктывкаре. Вместе с мощностями антропогенных горизонтов, имеющих гумусово-аккумулятивный характер, растут содержание и, по всей видимости, запасы органического вещества [17]. Этому способствует подщелачивание агро- и урбогенных почв. В пахотной почве pH верхних горизонтов увеличивается примерно на единицу по сравнению с природной, в городской возрастает на 2 единицы. Кроме того, в городской почве отчётливо заметно увеличение значений pH вниз по профилю. Также растёт электропроводность, показываю-

щая увеличение концентрации минеральных солей в почвенном растворе, и содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} (рис. 3, см. цв. вкладку II). При отсутствии явной карбонатности толща антропогенных горизонтов почв г. Сыктывкара содержит больше оснований в почвенном поглощающем комплексе, чем природные горизонты.

Содержание подвижных форм питательных элементов в антропогенных горизонтах выше, чем в верхних горизонтах минеральной части профиля целинной подзолистой почвы. В иллювиальных горизонтах и на переходе к породе фосфор накапливается и в целинной, и в трансформированных почвах. Это может быть обусловлено как утяжелением гранулометрического состава срединных горизонтов профиля и, соответственно, изменением в них состава минералов, так и аккумуляцией фосфатов двухвалентного железа, активно мигрирующих в профиле подзолистых почв в условиях гумидного климата.

Промывной водный режим и фульватный характер органического вещества [10] приводят к перераспределению подвижного железа по профилю в природной и агротрансформированной почве. Распределение его в обоих случаях бимодальное, аккумулятивно-элювиально-иллювиальное, с максимумами в микропрофиле подзола или в пахотных горизонтах, а также в иллювиальных горизонтах. В городских почвах отмечено увеличение содержания подвижного железа в урбиковых и техногенных горизонтах. В современном гумусовом горизонте и в урбогенных горизонтах урбостратозёма, содержащих максимальное количество артефактов, оно превышает таковое в подстилке и в горизонтах $\text{E}_{\text{L}}[\text{e-hf}]$ лесной почвы. Можно предположить, что в условиях малого содержания карбонатов органическое вещество городских почв Сыктывкара связано в основном с железом, или ассоциировано с накоплением аморфных гидроксидов железа, что соответствует зональным характеристикам [18].

Специфика элювиальных горизонтов в городских почвах. В рассмотренном ряду почв особое внимание обращает на себя элювиальный горизонт (E_{L}), который формируется в целинной подзолистой почве под пологом лесной растительности. В системе горизонтов городских почв это первый сохранившийся природный горизонт, располагающийся под толщей антропогенных горизонтов. Он маркирует нижнюю границу культурного слоя и переход к погребённой почве. Изменения свойств

горизонта E_{L} в процессе агро- и урбогенной трансформации имеют диагенетический характер и обусловлены воздействием почвенных растворов, поступающих в условиях промывного водного режима вниз по профилю из новых антропогенных горизонтов. Во всех исследованных почвах горизонты E_{L} близки по содержанию физической глины и ила (рис. 3, см. цв. вкладку II), что свидетельствует об их морфологической сохранности. Цвет горизонта E_{L} темнеет в рассмотренном ряду урбогенной трансформации, его оттенок чуть насыщеннее, что могло бы свидетельствовать о проникновении в него и накоплении железа и гумуса (табл.). Однако содержание подвижного железа в погребённых горизонтах E_{L} невелико. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ повышается всего с 0,2 до 0,3%. В погребённых почвах Москвы и Ярославля содержание органического углерода в горизонте E_{L} аналогично, что указывает на схожесть характера трансформаций в погребённых почвах [5–7].

Уменьшение светлоты горизонта E_{L} можно объяснить наличием соединений марганца, влияние на цвет которых отмечается в отсутствии окраски за счёт гумусовых веществ [19]. При увеличении мощности антропогенных горизонтов электропроводность показывает рост насыщенности почвенного раствора горизонтов E_{L} . Количество поглощённых оснований и pH также возрастают (табл.). Даже в отсутствие карбонатов pH достиг нейтральных и слабощелочных значений. Это может приводить к увеличению содержания несиликатных соединений марганца, которые служат меланизирующим пигментом для элювиальных горизонтов антропогенно изменённых почв и/или способствовать полимеризации и потемнению почвенных органических веществ [19].

Также отмечается увеличение желтизны сохранившихся горизонтов природных почв, находящихся под пахотными, или погребёнными под урбогенными. Возможно, это связано с увеличением синтеза гетита, которое в свою очередь ассоциировано с повышением содержания органического вещества. Краснота обусловлена гематитом, преимущественно унаследованным от пород. Он является устойчивым в условиях формирования подзолистых почв, в верхних горизонтах которых часто происходит его редукция (тон из 7,5YR становится 10YR). Однако в ещё большей степени преобладание гетита как красящего компонента почв выражено в почвах, преобразованных антропогенным воздействием благодаря ряду факторов: увеличению содержания

органического вещества, образованию железо-органических комплексов, при разрушении которых микроорганизмами происходит синтез устойчивого гетита. Также этот процесс ускоряется при наличии карбонатов в почвах. Ещё одним фактором, стимулирующим образование гетита, является переувлажнение. Увеличение плотности сложения и формирование слабоводопроницаемых горизонтов, характерные для городских почв [1, 16], и повышение влажности почв под влиянием более гумидных условий микроклимата города [20] могут способствовать редукции гематита и образованию гетита [21].

Помимо изменений морфологических цветовых свойств, обычно связанных с изменениями в минералогическом составе и химии соединений железа, при агрогенном и урбогенном воздействиях происходят изменения в составе почвенного раствора, о чём косвенно свидетельствуют полученные данные, и почвенного поглощающего комплекса сохранившихся горизонтов природных почв. При окультуривании в элювиальных горизонтах возрастает содержание обменных кальция и магния, подвижных калия и фосфора, растёт минерализация почвенного раствора. С глубиной это воздействие становится всё менее выраженным и фактически не отражается на химическом составе субэлювиальных горизонтов (BEL). Под влиянием урбопедогенеза изменения в большей степени связаны с поступлением в почву карбонатов кальция и резким повышением pH, электропроводности и содержания обменного кальция в погребённом элювиальном горизонте, что делает его по данным свойствам полностью отличным от природных подзолистых горизонтов.

Заключение

На примере эволюционного ряда почв г. Сыктывкара и его окрестностей: подзолистая с микропрофилем подзола → агродерново-подзолистая → урбодерново-подзолистая → урбостратозём, показано, что изменения строения и свойств городских почв, образовавшихся на месте подзолистых почв, происходят за счёт привноса и механического перемешивания материала в верхней части профиля на начальном этапе их окультуривания. На этапе воздействия городской застройки основным процессом, формирующим новые горизонты, является накопление городского седимента и его частичная проработка педогенетическими процессами с образованием антропогенных

горизонтов поверх существующего профиля. С увеличением стадий изменения землепользования возрастает общая мощность антропогенных горизонтов. По мере увеличения времени и степени антропогенной нагрузки возрастает эвтрофикация городских почв – увеличиваются количество поглощённых оснований, pH, общая минерализация водной вытяжки, содержание органического углерода и питательных элементов. Обнаружены косвенные признаки изменения состава минералов железа и марганца в связи с изменением pH.

Совпадение в профильном распределении максимумов содержания органического вещества и подвижного железа свидетельствует о частичном сохранении зональных тенденций почвообразования в условиях антропогенного воздействия на территории г. Сыктывкара. При этом в почвах г. Сыктывкара не выявлено признаков современного оподзоливания и лессиважа, а также характерных для городских почв морфологических признаков перераспределения первичных карбонатов из антропогенных включений. Нижняя часть профилей городских почв не несёт признаков трансформации, что может быть обусловлено либо недостаточностью срока антропогенного воздействия, либо консервацией свойств погребённых горизонтов под привнесённым урбогенным материалом. Выявленные закономерности в изменении свойств почв г. Сыктывкара в целом соответствуют ранее установленным тенденциям в эволюционных изменениях почв на территории городов Европейской части России.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (рег. № 122040600023–8).

References

1. Soil, city, ecology / Ed. G.V. Dobrovolsky. Moskva: Fond "Za ekonomicheskuyu gramotnost", 1997. 320 p. (in Russian).
2. Huot H., Séré G., Vidal-Beaudet L., Leguédois S., Schwartz C., Watteau F., Morel J.L. Pedogenic processes in soils of urban, industrial, traffic, mining and military areas // Soils within cities. Stuttgart: Catena-Schweizerbart, 2017. P. 71–77.
3. Pickett S.T.A., Cadenasso M.L. Altered resources, disturbance, and heterogeneity: A framework for comparing urban and non-urban soils // Urban Ecosyst. 2009. V. 12. P. 23–44. doi: 10.1007/s11252-008-0047-x
4. Goncharova O.Yu., Semenyuk O.V., Stoma G.V. Research on soils of urban areas: Analysis of methodological

aspects and approaches (a case study of Moscow city) // *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 2021. V. 76. No. 4. P. 169–176. doi: 10.3103/S0147687421040037

5. Engovatova A., Golyeva A. Anthropogenic soils in Yaroslavl (Central Russia): history, development and landscape reconstruction // *Quat. Int.* 2012. V. 265. P. 54–62. doi: 10.1016/j.quaint.2012.02.039

6. Alexandrovskaya E.I., Alexandrovskiy A.L. History of the cultural layer in Moscow and accumulation of anthropogenic substances in it // *Catena*. 2000. V. 41. P. 249–259. doi: 10.1016/S0341-8162(00)00107-7

7. Golyeva A., Khokhlova O., Engovatova A., Koval V., Aleshinskaya A., Kochanova M., Makeev A., Puzanova T., Kurbanova F. The application of buried soil properties for reconstruction of various stages of early habitation at archaeological sites in Moscow Kremlin // *Geosciences*. 2018. V. 8. No. 12. Article No. 447. doi: 10.3390/geosciences8120447

8. Dolgikh A.V., Aleksandrovskii A.L. Soils and cultural layers in Velikii Novgorod // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. No. 5. P. 477–487. doi: 10.1134/S1064229310050017

9. Aleksandrovsky A.L., Lapshin V.A., Grigorieva N.V., Aleksandrovskaya E.I., Skripkin V.V. Soil formation at Staraya Ladoga in the Neolithic and early Medieval time // *Notes of the Institute of the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences*. Sankt-Peterburg: IIMC RAS, 2018. No. 18. P. 99–104 (in Russian). doi: 10.31600/2310-6557-2018-18-99-104

10. Atlas of soils of the Komi Republic / Ed. G.V. Dobrovolsky, A.I. Taskaev, I.V. Zaboeva. Syktyvkar: Komi Republic Printing House, 2010. 356 p. (in Russian).

11. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).

12. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.N., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 341 p. (in Russian).

13. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system // *Eurasian Soil Science*. 2014. V. 47. No. 10. P. 959–967. doi: 10.1134/S1064229314100093

14. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition [Internet resource] <https://www.lss.ls.tum.de/boku/wrb-working-group/> (Accessed: 05.09.2024).

15. Vtyurin G.M. Paleocryogenesis and paleopedoformation in taiga soils of European Northeast // *Cryosphaera Zemli*. 1999. V. 3. No. 2. P. 86–96 (in Russian).

16. Yang J.-L., Zhang G.-L. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2015. V. 61. Sup. 1. P. 30–46. doi: 10.1080/00380768.2015.1035622

17. Vasenev V.I., Prokof'eva T.V., Makarov O.A. The development of approaches to assess the soil organic carbon pools in megapolises and small settlements // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. No. 6. P. 685–696. doi: 10.1134/S1064229313060100

18. Vodyanitsky Yu.N., Dobrovolsky V.V. Ferrous minerals and heavy metals in soils. Moskva: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 1998. 216 p. (in Russian).

19. Vodyanitsky Yu.N. Mineralogy and geochemistry of manganese (literature review) // *Pochvovedenie*. 2009. No. 10. P. 1256–1265 (in Russian).

20. Landsberg G.E. City Climate, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 248 p. (in Russian).

21. Vodyanitsky Yu.N. Chemistry and mineralogy of soil iron. Moskva: V.V. Dokuchaev Soil Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 2002. 236 p. (in Russian).

Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове заповедных территорий Республики Коми

© 2024. Е. В. Яковлева, к. б. н., н. с.,
М. И. Василевич, к. б. н., н. с.,
Д. Н. Габов, 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: kaleeva@ib.komisc.ru

Исследование накопления полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в снежном покрове заповедных северных территорий позволило выявить незначительные содержания ПАУ в диапазоне 30–46 нг/дм³. Лёгкие ПАУ находились преимущественно в растворённом виде, тяжёлые аккумулировались на аэрозольных частицах. В снежном покрове ПАУ были представлены в основном нафталином и фенантреном. Все исследованные образцы характеризовались низкой токсикологической активностью. На основании диагностических соотношений ПАУ установлено их природное не пирогенное происхождение. Анализ главных компонент (РСА) продемонстрировал значимую схожесть всех исследуемых участков по составу ПАУ. Все вышеперечисленные факты позволяют отнести исследуемые территории к фоновым. При этом наибольшим содержанием тяжёлых ПАУ и токсикологической активностью отличался снежный покров вблизи п. Якша в Печоро-Илычском заповеднике. Показано, что печное отопление в большей степени оказывает влияние на состав ПАУ снежного покрова по сравнению с автодорогами с низкой интенсивностью движения вблизи заказника «Параськины озёра».

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, накопление, происхождение, снег, особо охраняемые природные территории.

Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of protected areas of the Komi Republic

© 2024. E. V. Yakovleva ORCID: 0000-0003-0793-1468[†]
M. I. Vasilevich ORCID: 0000-0002-9917-6270[†]
D. N. Gabov ORCID: 0000-0002-3786-9872[†]

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: kaleeva@ib.komisc.ru

We studied the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in snow cover of protected northern areas Komi Republic. PAHs in snow were determined by high-performance liquid chromatography. Insignificant PAHs levels in the range of 30–46 ng/L were found in the snow cover of protected areas. Naphthalene and phenanthrene were the main PAHs in the snow cover. Light PAHs were mainly present in dissolved form. The heavy PAHs in the snow cover were present in trace amounts and accumulated on the aerosol particles. Low toxicological activity was observed in all tested samples. The natural, non-pyrogenic origin of the PAHs was established on the basis of their diagnostic ratios. This may be an indication that PAHs enter the snowpack mainly through transformation of plant biomass and global air mass transport. The PCA showed a significant similarity of the PAH composition of all investigated sites. All the above facts allow relating the studied areas to background. It was found that the level of low-volatility PAHs entering the protected areas in 2023 is the same as the level of entering the background areas of the taiga zone of the Komi Republic in 2005–2007. The highest content of heavy PAHs and toxicological activity was found in the snow cover near the Yaksha settlement in the Pechoro-Ilychsky Reserve. Aerosol polyarenes were the main contributors to PAH toxicity. In comparison with low-intensity roads near the “Paraskiny Lakes” Reserve, it is shown that furnace heating has a greater effect on the PAHs composition in the snow cover.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, accumulation, origin, snow, protected areas.

Снежный покров, и в целом атмосферные осадки, могут эффективно накапливать вещества, в том числе ПАУ [1–3] и являются источником накопления ПАУ в почвах. Загрязнённость снежного покрова является отражением степени антропогенного воздействия на окружающую среду (ОС). Снежный покров способен сохранять и накапливать вещества, поступающие на его поверхность из атмосферы, что позволяет использовать его как индикатор аэротехногенного загрязнения, и выявлять зоны с различной степенью загрязнения [4–6]. По количеству индивидуального вещества и суммарному содержанию загрязняющих веществ, накопившихся в снежном покрове в районе расположения того или иного промышленного предприятия, можно судить о степени влияния производства на ОС. Это особенно важно в условиях северных ландшафтов, поскольку снежный покров сохраняется в течение 6–8 месяцев. Поэтому выбор снежного покрова как объекта исследований можно считать наиболее оправданным.

К настоящему времени большинство работ по исследованию состава ПАУ снежного покрова посвящено исследованию территорий, подверженных интенсивному аэротехногенному воздействию [2, 3, 5, 7]. Исследования фоновых участков посвящены в основном удалённым северным регионам, таким как Антарктида, Гренландия, Шпицберген [8–11]. Содержание ПАУ в воздухе и снежном покрове удалённых северных территорий, как правило, связывают с локальным воздействием научных станций и разного рода отопительных систем [11, 12], и глобальным переносом [8–10, 13–16]. Исследования накопления ПАУ на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) единичны [13, 16, 17]. В нашем случае исследовался снежный покров фоновых ООПТ, не подверженных интенсивному антропогенному воздействию. Подобные исследования позволяют оценить масштабы воздействия промышленных предприятий на уникальные экосистемы ООПТ, особенно уязвимые в условиях Крайнего Севера, и сделать заключение о соответствии качества природной среды статусу охраняемых территорий. Полиарены относятся к канцерогенным, мутагенным, токсичным органическим соединениям [18, 19]. Их повышенные концентрации в снежном покрове при таянии могут привести к поступлению ПАУ в подземные и поверхностные воды, растения напочвенного покрова, почвы и к дальнейшей миграции по пищевым цепям.

Печоро-Илычский заповедник с 1995 г. включён в состав объекта Всемирного наследия Юнеско «Девственные леса Коми». В заповеднике зарегистрировано 105 видов растений, 35 видов бриофитов, 64 вида лишайников, 4 вида млекопитающих, 19 видов птиц, 1 вид амфибий и 4 вида рыб, занесённых в Красную книгу Республики Коми. Среди них встречаются виды-эндемики и представители Красной книги РФ. Заказник «Параськины озёра» характеризуется большим количеством редких видов гидробионтов, в том числе реликтовых, обитающих только в чистой воде [20]. Загрязнение данных территорий может привести к катастрофическим последствиям для редких охраняемых видов, нарушению цепей питания и, как следствие, исчезновению уникальных экосистем, охрана которых является основной целью создания ООПТ.

Целью данного исследования было оценить состояние природной среды ООПТ Республики Коми на основании определения уровней поступления приоритетных загрязнителей ПАУ в экосистемы Крайнего Севера с зимними атмосферными осадками.

Объекты и методы исследования

Отбор проб снега был осуществлён непосредственно на территории заповедника и заказника в 2023 г. (рис. 1, см. цв. вкладку III). Отбор проб, хранение, их химический анализ были выполнены в соответствии с руководством по контролю загрязнения атмосферы [21].

Отбор проб снега проводили на открытых участках с ненарушенным снежным покровом 10 × 10 м на всю глубину залегания снежного покрова с помощью трубы с внутренним диаметром 4,5 см и площадью сечения 15,9 см². Количество кернов для каждой пробы 10–20. Нижнюю часть кернов (1–2 см) отбрасывали, чтобы не допустить попадания почвы в образец. Пробы снега взвешивали и хранили при температуре –20 °С до проведения анализа.

Исследования содержания ПАУ в снежном покрове проводили в ЦКП «Хроматография» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Талую воду объёмом 1 дм³ фильтровали через мембранный фильтр «Millipore» диаметром 47 мм с размером пор 0,45 мкм. Отдельно определяли содержание ПАУ в образцах талой воды и осадке на фильтре. Экстракцию ПАУ из образцов талой воды проводили тремя порциями гексана по 20 см³ с помощью механического экстрактора ЭЛ-1 («Сибэкоприбор», Россия). Полученные экстракты объединяли

Е. В. Яковлева, М. И. Василевич, Д. Н. Габов
«Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове
заповедных территорий Республики Коми». С. 72.

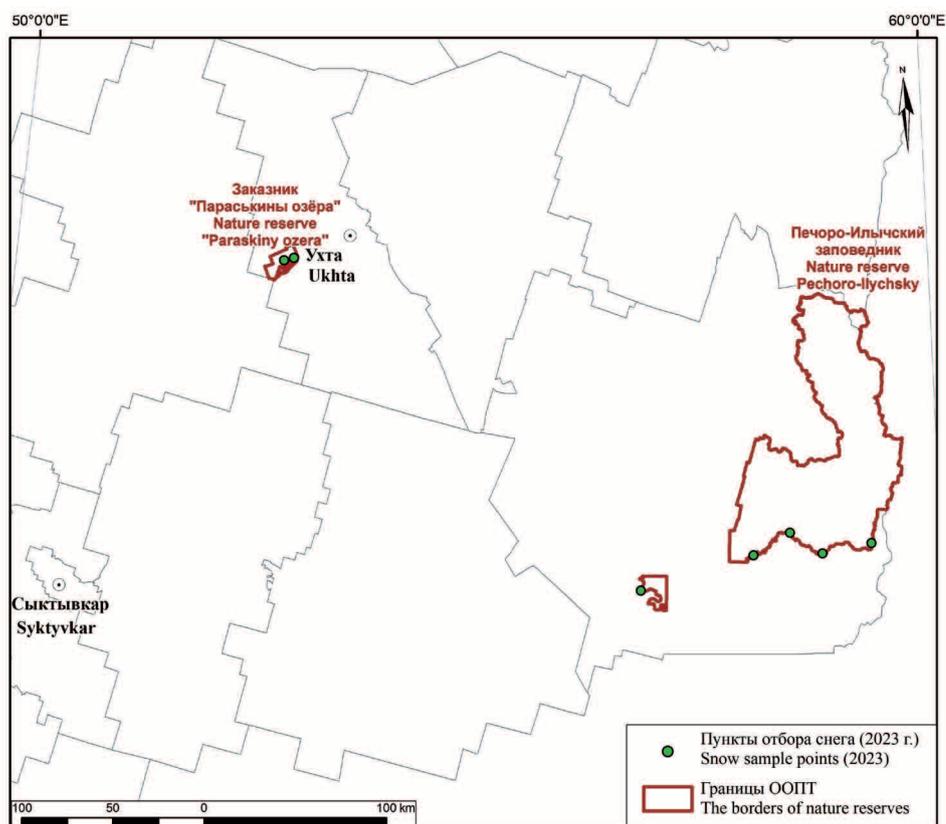


Рис. 1. Карта отбора проб / **Fig. 1.** Sampling map

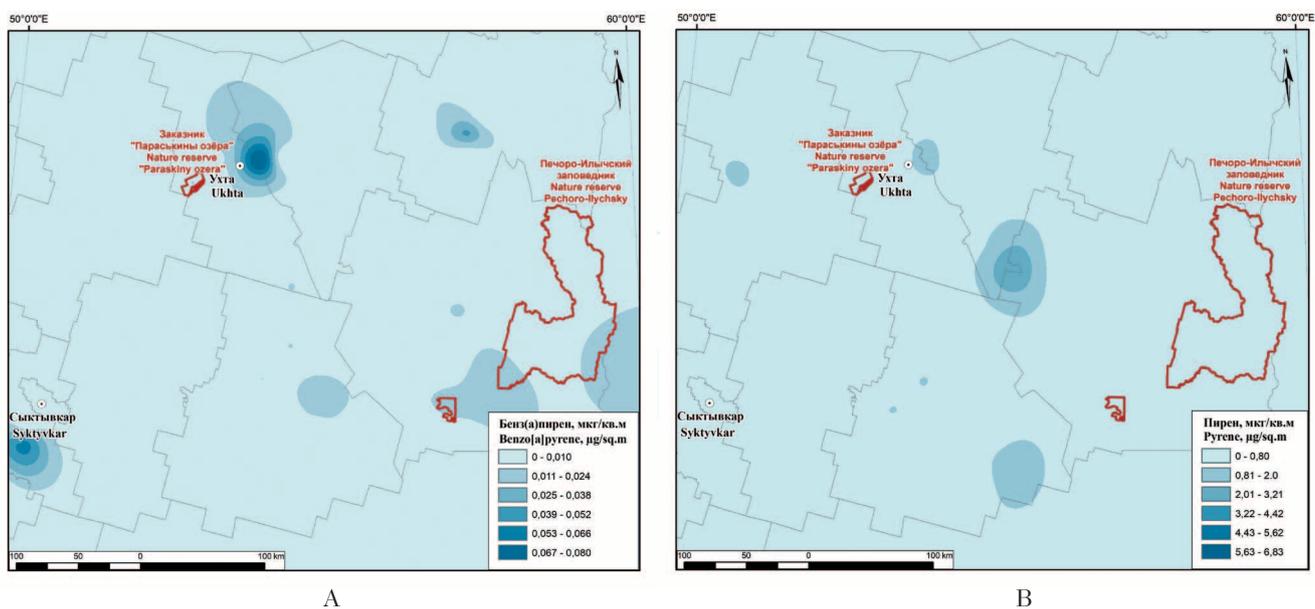


Рис. 3. Карты-схемы распределения в снеге фоновых и охраняемых территорий бенз[а]пирена (А) и пирена (В)
Fig. 3. Maps of benzo[a]pyrene (A) and pyrene (B) distribution in snow of background and protected areas

Е. В. Яковлева, М. И. Василевич, Д. Н. Габов
«Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове
заповедных территорий Республики Коми». С. 72.

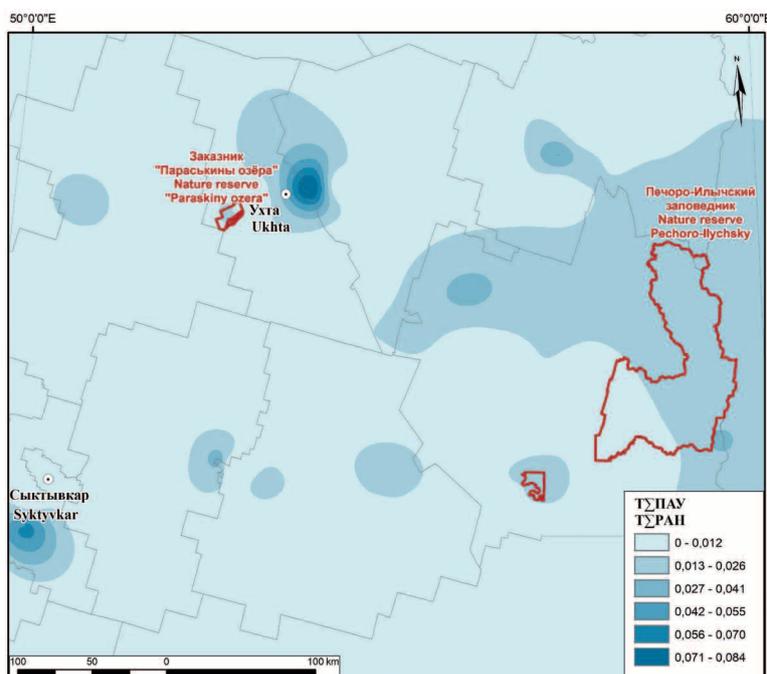


Рис. 4. Карта-схема распределения значений показателя суммарной токсикологической активности (ТСПАУ) / **Fig. 4.** Map of distribution of total toxicological activity indicator values (TSPAH)

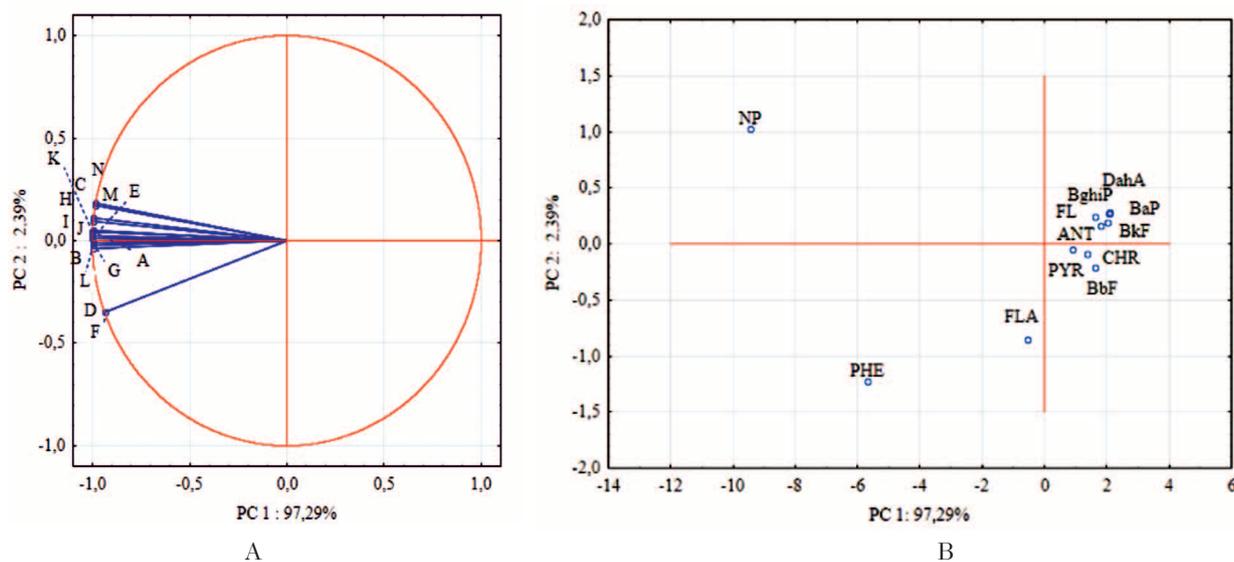


Рис. 5. PCA содержания ПАУ в снежном покрове охраняемых территорий, n=14. Обозначения: Печоро-Ильичский заповедник: А – участок 1, В – участок 2, С – участок 3, D – участок 4, E – участок 5, F – участок 6, G – участок 7, H – участок 8; п. Якша: I – участок 1, J – участок 2; Параськины озёра: K – участок 1, L – участок 2, M – участок 3, N – участок 4. ПАУ: NP – нафталин, FL – флуорен, PHE – фенантрен, ANT – антрацен, FLA – флуорантен, PYR – пирен, CHR – хризен, BbF – бенз[b]флуорантен, BkF – бенз[k]флуорантен, BaP – бенз[a]пирен, DahA – дибенз[a,h]антрацен, BghiP – бенз[ghi]перилен / **Fig. 5.** PCA of PAHs content in the snow cover of protected areas, n=14. Symbols: Pechoro-Ilychsky Reserve: A – site 1, B – site 2, C – site 3, D – site 4, E – site 5, F – site 6, G – site 7, H – site 8; v. Yaksha: I – site 1, J – site 2; Paraskiny Lakes Nature Reserve: K – site 1, L – site 2, M – site 3, N – site 4. PAH: NP – Naphthalene, FL – Fluorene, PHE – Phenanthrene, ANT – Anthracene, FLA – Fluoranthene, PYR – Pyrene, CHR – Chrysene, BbF – Benzo[b]fluoranthene, BkF – Benzo[k]fluoranthene, BaP – Benzo[a]pyrene, DahA – Dibenz[a,h]anthracene, BghiP – Benz[ghi]perylene

и упаривали на концентраторе Кудерна-Даниша («Supelco», США) при температуре 90 °С, заменяя растворитель на ацетонитрил.

Полиарены с фильтров экстрагировали дважды хлористым метилом на УЗ-ванне Branson 5510 (США). Полученные экстракты объединяли и упаривали на концентраторе Кудерна-Даниша при температуре 60 °С, с заменой растворителя на гексан. Экстракты очищали методом колоночной хроматографии на оксиде алюминия 2 степени активности по Брокману («Sigma-Aldrich», ЕС). Элюирование проводили смесью н-гексан:хлористый метилен 8:2. Элюат упаривали на концентраторе Кудерна-Даниша при температуре 90 °С, заменяя растворитель на ацетонитрил.

Содержание ПАУ в талой воде и фильтрах измеряли методом обращённо-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе «Люмахром». Условия хроматографирования: температура 30 °С, колонка «Supelco» Supelcosil™ LC-PAH 5 мкм (25 см × 2,1 мм), подвижная фаза – градиент ацетонитрил – вода.

Уровни поступления веществ со снежным покровом на поверхность в мкг/м² рассчитывали по формуле 1:

$$P = \frac{10 \cdot m \cdot V}{S \cdot n}, \quad (1)$$

где P – масса компонента, поступившего на единицу площади поверхности земли за весь период сохранения снежного покрова, мкг/м²; m – весовая концентрация компонента в талой воде, нг/дм³; V – объём талой воды всей пробы, дм³; S – площадь внутреннего поперечного сечения трубы для отбора проб снега, см²; n – число колонок снега, отобранных в данной точке; 10 – коэффициент для согласования размерности.

На основе полученных данных была рассчитана суммарная токсикологическая активность ПАУ ($T\Sigma\text{ПАУ}$) по формуле 2:

$$T \sum_{i=1}^n \text{ПАУ} = \sum K_{T\text{ПАУ}_i} \cdot \omega(\text{ПАУ})_i, \quad (2)$$

где $\sum K_{T\text{ПАУ}_i}$ – коэффициент токсичности i -го ПАУ относительно бенз[а]пирена, [22, 23], $\omega(\text{ПАУ})_i$ – массовая доля i -го ПАУ в объекте, нг/г.

Коэффициенты токсичности ПАУ относительно бенз[а]пирена (BaP): нафталин (NP) 0,001, фенантрен (PHE) 0,001, антрацен (ANT) 0,01, флуорантен (FLA) 0,001, пирен (PYR) 0,001, хризен (CHR) 0,01, бенз[б]флуорантен (BbF) 0,1, бенз[к]флуорантен

(BkF) 0,1, бенз[а]пирен (1), дибенз[а,h]антрацен (DahA) 1, бенз[g,h,i]перилен (BghiP) 0,01. Для расчёта коэффициентов токсичности используют показатели ЛД₅₀.

Статистический анализ для оценки значимости расхождения между средними данными проводился с помощью t -теста Стьюдента, $P=0,95$. Для проведения статистического анализа использовалась программа Statistica 6.0. При определении взаимосвязи в накоплении индивидуальных ПАУ между исследуемыми участками был проведён анализ главных компонент (PCA). Число факторов, извлекаемых из переменных, определялось по правилу Кайзера. Все статистические оценки проводились при заданном уровне значимости $p \leq 0,05$. Для построения карт-схем использовалась программа ArcGIS 9.2. Растры распределения параметров снега моделировали путём геостатистической интерполяции, применяя метод Spline (многоуровневый) с использованием программы SAGA 2.3.1.

Результаты и обсуждение

В снежном покрове исследуемых территорий нами было выявлено незначительное количество ПАУ. Массовая доля ПАУ варьировала в диапазоне 30–46 нг/дм³ (табл. 1, 2). Они были представлены в основном нафталином и фенантеном, их массовая доля составляла 62–85% от суммы всех ПАУ в снежном покрове. Нафталин и фенантрен преимущественно находились в растворённом состоянии, на 69–83%. Корреляция между содержанием ПАУ в растворённой форме и содержанием лёгких ПАУ в снеге составляла $r=0,86$ (при $n=14$, $p=0,05$). В целом в растворённом состоянии находились 60–80% всех ПАУ в снежном покрове. Тяжёлые ПАУ в снежном покрове присутствовали в следовых количествах 0,2–3,4 нг/г, что составляло 1–8% от общей массовой доли ПАУ в снеге. Тяжёлые ПАУ преимущественно содержались в составе аэрозолей на 75–100%. Корреляция между содержанием ПАУ на взвешенных частицах и содержанием тяжёлых ПАУ в снеге составляла $r=0,94$ (при $n=14$, $p=0,05$).

Расчёт коэффициента суммарной токсичности ПАУ в снежном покрове, который был для всех участков ниже 1, позволил установить низкий уровень токсичности для исследуемой территории. Наибольшие значения данного показателя отмечались на участке вблизи п. Якша, где основной вклад в токсичность ПАУ вносили полиарены аэрозолей (рис. 2).

Таблица 1 / Table 1

Содержание ПАУ в растворённой форме, нг/дм³ / Content of PAHs in dissolved form, ng/dm³

ПАУ PAHs	Печоро-Ильцинский заповедник Pechoro-Ilychsky Reserve								п. Якша v. Yaksha		Заказник «Параськины озёра» Paraskiny Lakes Nature Reserve				Средняя доля ПАУ для участка, % Average share of PAHs for the site, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	1	2	3	4	
Нафталин Naphthalene	18,2	14,2	12,7	7,5	10,0	8,4	15,5	17,9	13,2	14,5	13,1	12,8	15,7	16,7	54,08
Флуорен Fluorene	0,9	0,5	0,3	0,4	0,3	0,5	0,8	0,7	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	1,94
Фенантрен Phenanthrene	10,5	10,0	5,9	9,3	6,6	9,8	10,5	10,3	6,8	8,6	8,6	7,9	7,8	7,4	29,60
Антрацен Anthracene	0,6	0,6	0,4	0,8	0,4	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,4	0,7	0,4	0,7	2,05
Флуорантен Fluoranthene	3,2	2,6	4,5	3,4	4,5	3,8	2,5	2,6	2,4	1,9	2,8	3,1	4,6	2,2	9,11
Пирен Pyrene	1,0	2,0	1,0	1,8	1,0	1,5	1,6	1,0	1,7	1,6	0,9	0,4	1,0	1,1	3,13
Хризен Chrysene	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,0	0,4	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,10
Бенз[к]флуорантен Benzo[k]fluoranthene	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Бенз[а]пирен Benzo[a]pyrene	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
ΣПАУ / ΣPAHs	34,5	30,2	22,0	23,3	20,2	24,8	31,8	32,9	25,5	27,7	26,2	25,4	27,1	28,8	100,00

Таблица 2 / Table 2

Содержание ПАУ на взвешенных частицах, нг/дм³ / PAH content on suspended particulate matter, ng/dm³

ПАУ	Печоро-Ильчский заповедник Pechoro-Ilychsky Reserve								Средняя доля ПАУ для участка, % Average share of PAHs for the site, %		Заказник «Параськины озёра» Paraskiny Lakes Nature Reserve				Средняя доля ПАУ для участка, % Average share of PAHs for the site, %			
	1		2		3		4		1		2		3			4		
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	1	2		3	4	
Нафталин Naphthalene	3,8	2,8	4,7	3,4	3,9	4,0	3,5	3,6	33,2	4,2	5,9			5,6	3,9	5,3	4,4	44,8
Флуорен Fluorene	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	2,4	0,4	0,3			0,3	0,3	0,2	0,2	2,3
Фенантрен Phenanthrene	3,0	2,7	3,8	3,6	2,8	4,1	3,5	2,3	28,1	4,0	3,9			3,4	3,5	2,3	2,9	27,9
Флуорантен Fluoranthene	1,6	1,5	1,1	2,3	1,3	3,5	1,2	0,6	13,4	2,2	2,0			0,7	1,7	0,7	0,7	8,8
Пирен Pyrene	0,4	0,3	0,8	0,8	0,3	0,4	1,9	0,3	5,6	0,6	0,7			0,7	0,7	0,3	0,3	4,5
Хризен Chrysene	1,2	0,4	0,8	2,5	0,8	1,2	0,6	0,6	8,3	1,1	1,3			1,1	0,8	0,6	0,7	7,3
Бенз[b]флуорантен Benzol[b]fluoranthene	0,9	0,2	0,2	1,6	0,3	2,9	0,2	0,2	5,8	1,1	2,3			0,3	0,2	0,1	0,3	2,1
Бенз[k]флуорантен Benzol[k]fluoranthene	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,1	0,1	1,5	0,2	0,2			0,1	0,0	0,0	0,1	0,4
Бенз[a]пирен Benzol[a]pyrene	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0			0,1	0,0	0,0	0,0	0,2
Дибенз[a,h]антрацен Dibenz[a,h]anthracene	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,8	0,4	0,2			0,2	0,0	0,0	0,2	0,9
Бенз[ghi]перилен Benz[ghi]perylene	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,7	0,3	0,1			0,2	0,0	0,0	0,2	0,9
ΣПАУ / ΣPAHs	11,6	8,6	11,9	15,1	9,9	16,9	11,4	8,1	100,0	14,7	16,9			12,7	11,1	9,5	10,0	100,0

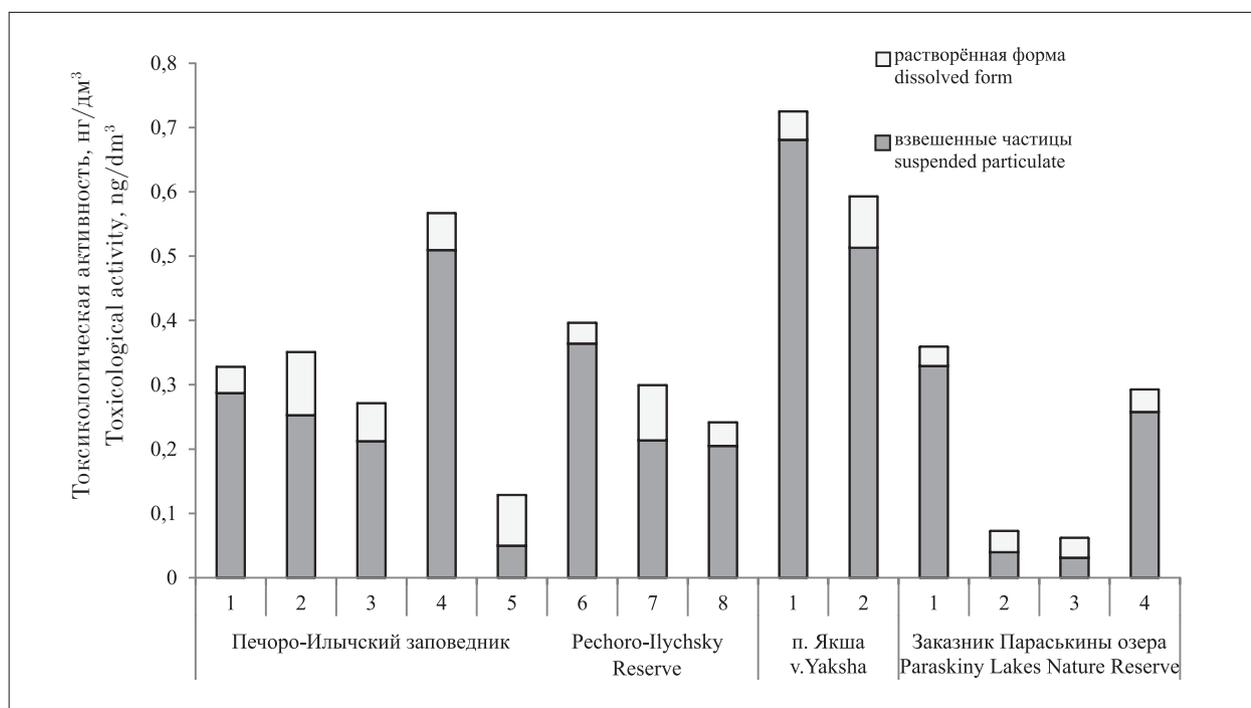


Рис. 2. Суммарная токсикологическая активность ПАУ снежного покрова
 Fig. 2. Total PAHs toxicological activity in the snow cover

Для наглядности нами построены карты-схемы распределения в снеге наиболее токсичных компонентов и показателя суммарной токсикологической активности (рис. 3, 4, см. цв. вкладки III, IV). Для этого использовали данные, полученные для фоновой территории таёжной зоны Республики Коми в 2005 и 2007 гг. [17]. Уровень поступления по малолетучим ПАУ в 2005–2007 гг. совпадает с уровнем поступления на охраняемые территории в 2023 г.

На основании полученных данных были рассчитаны диагностические критерии происхождения ПАУ в снежном покрове (табл. 3). Соотношение $Ant/(Ant + Phe)$ для всех исследованных проб снега было менее 0,1, что свидетельствовало о петрогенном (естественном) происхождении ПАУ [24–26], не связанном с процессами горения. Соотношение Phe/Ant более 10 [25, 27], и Flu/Py [25, 26] более 1 и $(Py + Flu)/(Chr + Ph)$ [25] и $Fl/(Fl+Py)$ [28] менее 0,5, также указывает на петрогенное происхождение ПАУ в снежном покрове исследованных нами участков. Петрогенное происхождение ПАУ также подтверждается соотношением лёгких и тяжёлых структур полиаренов более 1 [25, 28]. Отношение содержания «техногенных» и «природных» ПАУ $(Py + BaP)/(Phe + Chr)$ больше 1 свидетельствует о поступлении ПАУ из антропогенных источников [17]. В нашем случае все значения данного отношения были ниже 1, то

есть антропогенная нагрузка на охраняемые территории минимальна.

Результаты PCA объясняют 56,90% общей изменчивости ПАУ в снежном покрове (рис. 5, см. цв. вкладку IV). Размерность 12 входных переменных была уменьшена с помощью PCA до двух главных компонент: первая ось (PC1) объясняет 97,29%, а вторая (PC2) 2,39% общей изменчивости. В данном случае PC2 не значим. Установлено, что качественный и количественный состав ПАУ связаны для всех исследуемых участков по фактору PC1. В основном эта связь объясняется схожестью распределения доминирующих в составе ПАУ нафталина и фенантрена.

Содержание ПАУ для исследованных нами районов было на порядок ниже содержания ПАУ в снежном покрове Гренландии, сумма ПАУ в конце зимнего периода там составляла около 0,1–10 нг/г снежного покрова [8], в нашем случае 0,03–0,05 нг/г. Авторы показали преимущественное содержание в составе ПАУ техногенных флуорантена и пирена, в нашем случае доминировали ПАУ, которые могли иметь природное происхождение, нафталин и фенантрен [29]. Некоторые авторы считают, что присутствие нафталина, фенантрена и перилена в растениях, в частности, в стволах деревьев, указывает на их биологическое происхождение [30, 31]. В растениях присутствуют такие производные

фенантрена, как абиединовая и левопимаровая кислоты. Известно, что физиологически активные соединения, витамины и гормоны имеют в молекуле 2-3-ядерные структуры нафталинового и фенантренового типа [32, 33]. Преобладание в снежном покрове нафталина и фенантрена было выявлено на Южных Шетландских островах [10, 11] и на Тибетском нагорье [14]. Более поздние исследования содержания ПАУ в снежном покрове Гренландии [9, 15] показали более низкие концентрации ПАУ – 0,0019 нг/г, повышенных концентраций флуорантена обнаружено не было. Исследование снега национальных парков Аляски позволило выявить сходные с полученными нами содержания ПАУ 0,0003–0,017 нг/г [13, 16]. При этом состав ПАУ снега варьировал в зависимости от места отбора. На более северных участках преобладали фенантрен и бенз[b]флуорантен. В образцах снега, собранных с горы Наньшань (Синьцзян, Китай), суммарная концентрация ПАУ колебалась в пределах 0,07–0,16 нг/г [12], в образцах снега с горы Тайшань – 0,08 нг/г [34]. Исследование накопления ПАУ в свежеснежном покрове Харбина – крупного промышленного центра, позволило выявить значительные уровни накопления ПАУ 0,82–1,32 нг/г [5],

в свежеснежном покрове в Чанчуне на северо-востоке Китая – 26,6–36,9 нг/г [3].

В наших более ранних исследованиях состава ПАУ снежного покрова фоновых территорий южной, средней и северной подзон тайги нафталина выявлено не было, доминирующим ПАУ был фенантрен. Данный факт мог быть связан с потерями нафталина и, частично, фенантрена при пробоподготовке [17, 35]. Так как проводилось выпаривание пробы досуха, нафталин и фенантрен, как летучие компоненты, могли испаряться из пробы. В целом значения содержания ПАУ, по сравнению с нашими предыдущими исследованиями, увеличились в 3–5 раз, в основном за счёт обнаружения нафталина. Однако более тяжёлые ПАУ присутствовали на одинаковом уровне, благодаря чему появилась возможность построить карты-схемы пространственного распределения полиаренов в снежном покрове. Карты-схемы показывают, что содержание ПАУ в снеге достаточно низкое, очаги повышения отмечены для бенз[a]пирена в пункте вблизи п. Якша, где, вероятно, влияет печное отопление, и в крайнем пункте вблизи г. Койп, что обусловлено конденсацией осадков в предгорьях Урала. Между тем известно, что поступление компонентов в предгорьях на

Таблица 3 / Table 3

Диагностические критерии происхождения ПАУ в снежном покрове
Diagnostic ratios for the PAHs origin in snow cover

Объект Object	№ участка Site	A	B	C	D	E	F
Печоро-Ильчский Заповедник Pechoro-Ilychsky Reserve	1	0,043	22,0	3,30	0,42	0,44	33,4
	2	0,044	22,0	1,83	0,48	0,24	50,5
	3	0,037	25,9	1,52	0,42	0,26	49,3
	4	0,056	16,9	2,16	0,53	0,20	15,3
	5	0,043	22,4	2,21	0,39	0,31	67,5
	6	0,043	22,5	3,69	0,60	0,30	11,3
	7	0,038	25,0	1,03	0,49	0,22	65,6
	8	0,034	28,3	2,46	0,33	0,41	78,0
п. Якша v. Yaksha	1	0,038	25,1	2,02	0,55	0,24	17,1
	2	0,039	24,9	1,73	0,44	0,21	14,5
Заказник «Параськины озёра» Paraskiny Lakes Nature Reserve	1	0,034	28,1	2,29	0,38	0,33	47,3
	2	0,069	13,6	4,16	0,48	0,36	181,7
	3	0,000	20,8	1,83	0,34	0,39	178,5
	4	0,062	15,2	1,99	0,39	0,40	51,9
Болота, тундровая зона Bogs in tundra zone	(Растения / Plants) min	0	19,3	0,87	0,23	0,36	9,8
	(Растения / Plants) max	0,049	45,1	3,35	0,83	1,0	108,3

Примечание / Note: A – антрацен/(антрацен+фенантрен) – Ant/(Ant + Phe); B – фенантрен/антрацен – Phe/Ant; C – флуорантен/пирен – Flu/Py; D – (пирен+флуорантен)/(хризен+фенантрен) – (Py+Flu)/(Chr+Ph); E – флуорен/(флуорен+пирен) – Fl/(Fl+Py); F – $\Sigma 2$ -4-ядерных ПАУ/ $\Sigma 5,6$ -ядерных / $\Sigma 2$ -4- nucleus PAHs/ $\Sigma 5,6$ -nucleus PAHs.

единицу площади может быть сопоставимо с районами с высоким уровнем промышленного воздействия [36], в нашем случае значительного повышения массовой доли ПАУ выявлено не было. На границе Ухтинского и Сосногорского районов, где расположен Сосногорский газоперерабатывающий завод (СГПЗ) также наблюдается высокое содержание полиаренов. Повышенное содержание ПАУ в Вуктыльском районе и вблизи г. Сыктывкара является следствием локального техногенного воздействия.

Нафталин и фенантрен наиболее легко-растворимые ПАУ, что объясняло их преимущественно растворённое состояние [14, 37]. Слаборастворимые тяжёлые полиарены находились в составе аэрозолей [38]. Факт невысокого содержания в аэрозолях нафталина и фенантрена позволяет предположить, что источниками ПАУ были частицы природного происхождения почвы и растений, а не только процессы дальнего переноса от удалённых промышленных предприятий. Как правило, для загрязнённых участков характерно повышенное содержание ПАУ в аэрозолях [2, 5]. Вблизи п. Якша, где присутствует печное отопление, выявлено некоторое повышение доли аэрозольных форм ПАУ, сопровождающееся повышением содержания тяжёлых полиаренов, близкие значения получены для 2 участков в заповеднике. Снег п. Якша характеризовался максимальными уровнями токсичности по сравнению с другими участками отбора, что позволяет утверждать о большем влиянии локального сжигания древесины на поступление ПАУ в экосистемы по сравнению с автодорогами с малым трафиком (рис. 5). Другими авторами также установлен преобладающий вклад отопления жилых помещений в выбросы ПАУ, даже для крупного города Средиземноморья Рима [39]. Участки, расположенные вблизи автодороги на удалении 2,1 и 5,5 км вглубь заказника «Параськины озёра», практически не отличались по количественному содержанию ПАУ.

Токсикологическая активность снежного покрова не зависела от расстояния от дороги. На приближённых к дороге участках отмечено небольшое возрастание содержания нафталина, в 1,2–1,3 раза. Данный факт мог быть связан с барьерной функцией леса, который препятствовал переносу ПАУ от автодороги на дальние расстояния. Нафталин обладает низкой токсичностью, поэтому его вклад в токсикологическую активность минима-

лен, для большинства участков не более 10%. Данные по исследованию накопления ПАУ в снежном покрове вблизи дорог с разной интенсивностью трафика свидетельствуют о резком снижении содержания ПАУ в снеге уже в 5 м от дорог [2]. Возможно, это связано со снижением летучести ПАУ при низкой температуре [7]. Также на карте-схеме (рис. 4) отмечаются высокие значения показателя ТΣПАУ вблизи СГПЗ, локально вблизи дорог с высоким трафиком и в предгорьях Урала, где идёт накопление веществ в снеге, связанное с барьерной ролью Уральских гор.

Рассчитанные диагностические соотношения ПАУ свидетельствуют об отсутствии пирогенного вклада в состав ПАУ снежного покрова [24–26]. Соотношения наиболее показательны для снежного покрова, как компонента, характеризующего состав атмосферных выпадений с минимизированным вкладом почвенной и растительной органики. Авторы часто отмечают пирогенное происхождение ПАУ в снежном покрове [11, 34]. В нашем случае даже вблизи п. Якша при наличии печного отопления в снежном покрове пирогенный фактор не выявлен. Для воздействия трафика характерны значения $F1/(F1+Pyr)$ более 0,5 [28]. Нами таких значений также выявлено не было даже в районах вблизи дорог. Это подтверждает теорию о незначительном перемещении ПАУ в условиях таёжной зоны богатой древесной растительностью. При этом нельзя исключать дальнего переноса с воздушными массами таких ПАУ, как нафталин и фенантрен. На основании соотношения «техногенных» и «природных» ПАУ можно утверждать о низкой антропогенной нагрузке на исследованные экосистемы. Сходные данные были получены ранее для снежного покрова таёжной зоны Республики Коми [17].

На основании ранее полученных данных о содержании ПАУ в растениях на фоновых участках [40, 41] были рассчитаны те же диагностические соотношения, что и для снежного покрова. Значения всех диагностических соотношений для снежного покрова и растений были близки. Таким образом, трансформация растительной биомассы, наряду с дальним переносом, могла быть основным источником ПАУ в снежном покрове исследованных охраняемых территорий.

Данные PCA указывают на схожесть распределения ПАУ на всех исследуемых участках, которые могут быть приравнены к фоновым.

Заключение

Исследование содержания ПАУ в снежном покрове ООПТ Республики Коми в растворённой форме и в составе взвешенных частиц показало, что содержание ПАУ на исследованных территориях соответствует фоновым уровням, характерным для Гренландии, Антарктики и Аляски. Легко растворимые лёгкие ПАУ находятся в снежном покрове фоновых территорий преимущественно в растворённом состоянии, тяжёлые в основном концентрируются на аэрозолях снега. На основании расчёта коэффициента токсичности ПАУ установлено, что локальное сжигание древесины в большей степени влияет на поступление ПАУ в экосистемы по сравнению с автодорогами с малым трафиком. Расчёт диагностических критериев происхождения ПАУ позволил выявить петрогенное происхождение ПАУ в снежном покрове, что может свидетельствовать о поступлении ПАУ в снежный покров преимущественно путём трансформации растительной биомассы и в процессе глобального переноса воздушных масс. Для более точной интерпретации результатов необходимо проведение дополнительных исследований с охватом большей территории.

Работа выполнена в рамках бюджетных тем ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН 122040600023-8 и 122040600026-9.

References

1. Franz T.P., Eisenreich S.J. Snow scavenging of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in Minnesota // Environ. Sci. Technol. 1998. V. 32. No. 12. P. 1771–1778. doi: 10.1021/es970601z
2. Kuoppamäki K., Setälä H., Rantalainen A.L., Kotze D.J. Urban snow indicates pollution originating from road traffic // Environ. Pollut. 2014. V. 195. P. 56–63. doi: 10.1016/j.envpol.2014.08.019
3. Wei Y., Liu S.S., Wang Z., Wang Z., Wang S. The distribution variation of polycyclic aromatic hydrocarbons between fresh snow and seasonal snowpack in campus in Changchun City, Northeast China // Water Air Soil Pollut. 2017. V. 228. Article No. 233. doi: 10.1007/s11270-017-3409-2
4. Cui S., Song Z., Zhang L., Zhang Z., Hough R., Fu Q., An L., Shen Z., Li Y., Liu D., Gao S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China // Atmos. Environ. 2019. V. 215. Article No. 116915. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116915
5. Sun L., Ai X., Yao X., An Q., Liu X., Yakovleva E., Zhang L., Sun H., Zhang K., Zang S. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city,

- northeast China // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2023. V. 260. Article No. 115091. doi: 10.1016/j.ecoenv.2023.115091
6. Gabov D.N., Yakovleva E.V., Vasilevich M.I., Vasilevich R.S. Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow cover near fuel and energy enterprises of the Vorkuta city // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya. 2019. No. 1. P. 24–37 (in Russian). doi: 10.31857/S0869-78092019124-37
7. Nazarenko Y., Fournier S., Kurien U., Rangel-Alvarado R.B., Nepotchatykh O., Seers P., Ariya P.A. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles // Environ. Pollut. 2017. V. 223. P. 665–675. doi: 10.1016/j.envpol.2017.01.082
8. Masclet P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H. Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: Superficial snow // Atmos. Environ. 2000. V. 34. No. 19. P. 3195–3207. doi: 10.1016/s1352-2310(99)00196-x
9. Von Schneidmesser E., Schauer J.J., Shafer M.M., Hagler G.S.W., Bergin M.H., Steig E.J. A method for the analysis of ultra-trace levels of semi-volatile and non-volatile organic compounds in snow and application to a Greenland snow pit // Polar Sci. 2008. V. 2. No. 4. P. 251–266. doi: 10.1016/J.POLAR.2008.08.004
10. Szumińska D., Potapowicz J., Szopińska M., Czapiewski S., Falk U., Frankowski M., Polkowska Ż. Sources and composition of chemical pollution in Maritime Antarctica (King George Island), part 2: Organic and inorganic chemicals in snow cover at the Warszawa Icefield // Sci. Total Environ. 2021. V. 796. Article No. 149054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149054
11. Na G., Liu C., Wang Z., Ge L., Ma X., Yao Z. Distribution and characteristic of PAHs in snow of Fildes Peninsula // J. Environ. Sci. 2011. V. 23. No. 9. P. 1445–1451. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60605-5
12. Lei X., Li W., Lu J., Tong Y., Li S. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in snow of Mount Nanshan, Xinjiang: PAHs distribution in snow of Mount Nanshan // Water Environ. J. 2015. V. 29. No. 2. P. 252–258. doi: 10.1111/wej.12099
13. Landers D.H., Simonich S.L., Jaffe D.A., Geiser L.H., Campbell D.H., Schwindt A.R., Schreck C.B., Kent M.L., Hafner W.D., Taylor H.E., Hageman K.J., Usenko S., Ackerman L.K., Schrlau J.E., Rose N.L., Blett T.F., Erway M.M. The fate, transport, and ecological impacts of airborne contaminants in Western National Parks (USA). EPA/600/R-07/138. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, NHEERL, Western Ecology Division, Corvallis, Oregon, 2008. 438 p.
14. Liu X., Dong Z., Baccolo G., Gao W., Li Q., Wei T., Qin X. Distribution, composition and risk assessment of PAHs and PCBs in cryospheric watersheds of the eastern Tibetan Plateau // Sci. Total Environ. 2023. V. 890. Article No. 164234. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164234
15. Forsius M., Bourque S.K., Olsen M., Mähönen O., Jensen H., Kroglund M., Lundberg T., Tsaturov Yu., Kuperberg M., Krümmel E., Staffansson J. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Norway, Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017. 353 p.

16. Usenko S., Simonich S.L.M., Hageman K.J., Schrlau J.E., Geiser L., Campbell D.H., Appleby P.G., Landers D.H. Sources and deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons to western U.S. national parks // *Environ. Sci. Technol.* 2010. V. 44. No. 12. P. 4512–4518. doi: 10.1021/es903844n
17. Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Gabov D.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow of the taiga zone background territories of the European northeast of Russia // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, Hidrogeologiya, Geokriologiya.* 2014. No. 4. P. 337–343 (in Russian).
18. Petit P., Maître A., Persoons R., Bicout D.J. Lung cancer risk assessment for workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons in various industries // *Environ. Int.* 2019. V. 124. P. 109–120. doi: 10.1016/j.envint.2018.12.058
19. Ren A. Environmental pollutants and neural tube defects // *Reproductive and Developmental Toxicology* / Ed. R.C. Gupta. Cambridge: Academic Press, 2017. P. 1139–1166. doi: 10.1016/B978-0-12-804239-7.00061-5
20. Cadastre of protected natural territories of Komi Republic / Eds. S.V. Dyogteva, V.I. Ponomarev. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS, 2014. 425 p. (in Russian).
21. Air pollution control manual: guidance document. RD52.04.186-89. Leningrad: Goskomgidromet SSSR, 1991. 693 p. (in Russian).
22. Nisbet I.C.T., LaGoy P.K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 1992. V. 16. No. 3. P. 290–300. doi: 10.1016/0273-2300(92)90009-X
23. U.S. EPA. Development of a relative potency factor (RPF) approach for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) mixtures. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2010. 354 p.
24. Gune M.M., Ma W.L., Sampath S., Li W., Li Y.F., Udayashankar H.N., Balakrishna K., Zhang Z. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air and soil surrounding a coal-fired thermal power plant in the southwest coast of India // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. V. 26. P. 22772–22782. doi: 10.1007/s11356-019-05380-y
25. Khaustov A.P., Redina M.M. Geochemical markers based on concentration ratios of PAH in oils and oil-polluted areas // *Geochem. Int.* 2017. V. 55. P. 98–107. doi: 10.1134/S0016702916120041
26. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // *Org. Geochem.* 2002. V. 33. No. 4. P. 489–515. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00002-5
27. Boitsov S., Jensen H.K.B., Klungsøyr J. Natural background and anthropogenic inputs of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in sediments of South-Western Barents Sea // *Mar. Environ. Res.* 2009. V. 68. No. 5. P. 236–245. doi: 10.1016/j.marenvres.2009.06.013
28. Tobiszewski M., Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environ. Pollut.* 2012. V. 162. P. 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025
29. Gennadiyev A.N., Pikovskii Yu.I., Tsibart A.S., Smirnova M.A. Hydrocarbons in soils: origin, composition, and behavior (review) // *Eurasian Soil Sci.* 2015. V. 48. No. 10. P. 1076–1089. doi: 10.1134/S1064229315100026
30. Krauss M., Wilcke W., Martius C., Bandeira A.G., Garcia M.V.B., Amelung W. Atmospheric versus biological sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a tropical rain forest environment // *Environ. Pollut.* 2005. V. 135. No. 1. P. 143–154. doi: 10.1016/j.envpol.2004.09.012
31. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Polyarenes accumulation in tundra ecosystem influenced by coal industry of Vorkuta // *Polish Polar Research.* 2020. V. 41. No. 3. P. 237–267. doi: 10.24425/ppr.2020.134122
32. Nesmeyanov A.N., Nesmeyanov N.A. The beginnings of organic chemistry. Book 2. Moskva: Khimiya, 1970. 824 p. (in Russian).
33. Rovinsky F.Y., Teplitskaya T.A., Alexeeva T.A. Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988. 223 p. (in Russian).
34. Wang Y., Li P.H., Li H.L., Liu X.H., Wang W.X. PAHs distribution in precipitation at Mount Taishan: China. Identification of sources and meteorological influences // *Atmos. Res.* 2010. V. 95. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1016/j.atmosres.2009.07.011
35. Vasilevich M.I., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Estimation of snow cover pollution of organic connections in the emissions influence zone of pulp and paper enterprise // *Theoretical and Applied Ecology.* 2007. No. 3. P. 43–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-043-04
36. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Fofonov A.V. The blocking role of the Ural mountains in the transboundary transfer of impurities from Europe to Asia // *Optika Atmosfery i Okeana.* 2010. V. 23. No. 11. P. 937–941 (in Russian).
37. Dong L., Lin L., He J., Pan X., Wu X., Yang Y., Jing Z., Zhang S., Yin G. PAHs in the surface water and sediments of the middle and lower reaches of the Han River, China: occurrence, source, and probabilistic risk assessment // *Process Saf. Environ. Prot.* 2022. V. 164. P. 208–218. doi: 10.1016/j.psep.2022.06.009
38. Insian W., Yabueng N., Wiriya W., Chantara S. Size-fractionated PM-bound PAHs in urban and rural atmospheres of northern Thailand for respiratory health risk assessment // *Environ. Pollut.* 2022. V. 293. Article No. 118488. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118488
39. Finardi S., Radice P., Cecinato A., Gariazzo C., Gherardi M., Romagnoli P. Seasonal variation of PAHs concentration and source attribution through diagnostic ratios analysis // *Urban Clim.* 2017. V. 22. P. 19–34. doi: 10.1016/j.uclim.2015.12.001
40. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Panyukov A.N. Accumulation of polyarenes in plants of peatlands on the coast of the Barents Sea // *Eurasian Soil Sc.* 2020. V. 53. No. 11. P. 1538–1548. doi: 10.1134/S1064229320110137
41. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Accumulation of polyarenes in higher plants of hummock peatlands in the southern and northern tundra // *Theoretical and Applied Ecology.* 2023. No. 1. P. 75–82 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-075-082

Влияние предварительной биоконверсии пшеничной соломы в модельной природоподобной системе на продуктивность растений

© 2024. Т. И. Зюбанова¹, к. б. н., м. н. с., О. М. Минаева^{1,2}, к. б. н., доцент,
Е. Е. Акимова¹, к. б. н., с. н. с., Е. Б. Дайбова¹, к. х. н., зав. ЛАЦ,

Н. Н. Терещенко^{2,3}, д. б. н., профессор,

¹СибНИИСХиТ-филиал СФНЦА РАН,
634050, Россия, г. Томск, ул. Гагарина, д. 3,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40,

e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru,
akimovanell@mail.ru, Edaibova@yandex.ru, ternat@mail.ru

Исследования, направленные на поддержание высокой продуктивности и стабильности искусственных экосистем, воспроизводящих процессы естественных ценозов, актуальны и интересны. Эффективным представляется включение в модельные системы, направленные на получение продукции, участвующих в переработке растительных отходов звеньев – редуцентов и детритофагов. В качестве такого звена перспективно использование дождевых червей, которые, наряду с утилизацией органики, обогащают субстраты микробиотой, в том числе с антагонистической и ростостимулирующей активностями. Цель данного исследования – оценка перспективности предварительной биоконверсии пшеничной соломы высшими базидиальными грибами пилолистником тигровым (*Lentinus tigrinus*) и вёшенкой устричной (*Pleurotus ostreatus*) для увеличения продуктивности растений салата. Работа проведена в лабораторных условиях с модельными системами, состоящими из субстрата (торф, навоз крупного рогатого скота и пшеничная солома с биоконверсией и без), дождевых червей (*Eisenia fetida*) и растений салата (*Lactuca sativa* var. *crispa* сорт Кредо). По окончании экспериментов оценивали листовую площадь, массу каждого растения (сырую и сухую), продуктивность растений салата, содержание основных биогенных элементов в растительной ткани и субстрате. Учитывали количество и массу взрослых червей, количество ювенильных червей, количество коконов и выход копролита. Установлено наличие значительного фитотоксичного эффекта при внесении соломы в субстрат. Включение в субстрат переработанной базидиомицетами соломы (10%) оказывало благоприятное действие на состояние популяции червей. Выращивание салата на субстратах с биоконвертированной соломой при интродукции дождевых червей увеличивало содержание основных биогенных элементов в растениях. Интродукция червей способствовала значимому снижению фитотоксичности субстратов. Таким образом, можно рекомендовать включение отходов грибоводства (субстраты после получения плодовых тел), в системы продукции зелёных культур совместно с интродукцией в субстрат червей.

Ключевые слова: *Eisenia fetida*, *Lactuca sativa*, *Lentinus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, переработка растительных отходов.

Effect of preliminary bioconversion of wheat straw on plant productivity in a model nature-like system

© 2024. T. I. Zyubanova¹ ORCID: 0000-0002-9429-9706, O. M. Minaeva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5925-6022,

E. E. Akimova¹ ORCID: 0000-0002-3279-8200, E. B. Daibova¹ ORCID: 0000-0002-6881-9667,

N. N. Tereshchenko^{2,3} ORCID: 0000-0002-3084-6926,

¹Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Branch of the Federal State Budgetary
Institution of Science, Siberian Federal Scientific Center
of Agrobiotechnologies, Russian Academy of Sciences,

3, Gagarina St., Tomsk, Russia, 634050,

²Tomsk State University,

36, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
36, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,
e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru,
akimovanell@mail.ru, Edaibova@yandex.ru, ternat@mail.ru

Studies focused on maintaining high productivity and stability of artificial ecosystems that reproduce the processes of natural cenoses are relevant and interesting. It seems to be effective to include decomposers, detritivores and vegetative waste in model systems aimed at obtaining products. The use of earthworms as detritivores is promising because they utilize the organic matter as well as enrich the substrates with microflora including those with antagonistic and growth-stimulating activities. The aim of this study was to assess the prospects of preliminary bioconversion of wheat straw by basidiomycetes (*Lentinus tigrinus* and *Pleurotus ostreatus*) to increase the productivity of lettuce plants. The work was carried out in laboratory conditions with model systems consisting of a substrate (peat, cattle manure and wheat straw with and without bioconversion), earthworms (*Eisenia fetida*) and lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa* cultivar Credo). The leaf area, the weight of each plant (wet and dry), the productivity of lettuce plants, and the content of the main biogenic elements in the plant tissue and substrate were evaluated. The number and weight of adult worms at the beginning and at the end of the experiment, and the number of juvenile worms at the end of the experiment, the number of cocoons, as well as coprolite weight and yield were considered. A significant phytotoxic effect when straw was added into the substrate was found. The addition of straw processed by basidiomycetes (10%) in the substrate had a favorable effect on the earthworm population. Growing lettuce on substrates with bioconverted straw and with the earthworm introduction increases the content of major macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium) in plants. The introduction of earthworms contributed to a significant decrease in the phytotoxicity of substrates. Thus, it is possible to recommend the inclusion of fungiculture wastes (such as substrates after fruiting bodies obtaining) in green crop production systems together with the introduction of earthworms into substrates.

Keywords: *Eisenia fetida*, *Lactuca sativa*, *Lentinus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, vegetative waste recycling.

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды (ОС) является сельское хозяйство, включающее в себя как применение ксенобиотиков (пестицидов и агрохимикатов), так и отходы сельскохозяйственных предприятий (животноводства, растениеводства), которые, при отсутствии переработки или формальном отношении к ней, также оказывают негативное влияние на ОС. При этом в Российской Федерации, как и в других развитых странах, одним из ключевых направлений развития научно-технического комплекса является обеспечение продовольственной безопасности. Данное направление реализуется как путём интенсификации традиционного растениеводства, так и путём создания комплексов производства продукции в условиях природоподобных систем. Исследования, которые определяли бы одновременно высокую продуктивность и стабильность природных экосистем, служат основой для попыток воспроизводства этих процессов в искусственных ценозах и относятся к числу наиболее приоритетных для многих стран.

Деятельность человека сопровождается накоплением различных видов отходов, которые, в большинстве своём, в экосистеме утилизируются гетеротрофным звеном (детритофагами и редуцентами), обеспечивающим не только цикличность процессов включения органики в круговорот веществ, но и стабильность функционирования биосферы, а значит, и биосфероподобных систем [4, 2]. Одними

из таких представителей являются дождевые черви. В природной экосистеме педоценоз представляет собой сложный биологический реактор, который полностью перерабатывает отмершую биомассу в минеральные элементы, необходимые фитоценозу для синтеза новой биомассы [3].

Среди органических остатков искусственных экосистем наибольший объём имеют продуценты (растения), в состав клеточных оболочек которых в наибольшей доле от общего содержания органического вещества входит целлюлоза и лигнин – наиболее труднорастворимые компоненты растительных остатков [4]. Следовательно, от целлюлозолитической активности редуцентов зависят объёмы и скорость включения значительной доли органических компонентов в новый биотический оборот [5]. Разложение данных соединений сопряжено не только с длительным сроком их утилизации редуцирующей микробиотой, но и выделением на протяжении биодеградации фитотоксичных компонентов [6, 7], затрудняющих включение растительных отходов в большом количестве в природоподобные системы. С этой точки зрения особый интерес вызывают высшие базидиальные грибы, являющиеся существенной частью наземных экосистем и важным звеном круговорота углерода в природе. Уникальной особенностью базидиомицетов является способность к синтезу сложного мультиферментного комплекса, обладающего широкой субстратной

специфичностью, что позволяет им разлагать не только органические вещества природного происхождения, но и различные ксенобиотики [4, 8].

В связи со сказанным, искусственные природоподобные системы могут являться не только элементом систем биоконверсии органических отходов, что имеет решающее значение в условиях вечной мерзлоты с замедленным протеканием биогеохимических циклов, но и являться способом получения растительной продукции, такой как зелёные культуры.

Цель работы – оценить влияние предварительной биоконверсии пшеничной соломы базидиомицетами и червями на растения салата и популяцию червей в модельной системе.

Объекты и методы исследования

Основа субстрата в экспериментах – сфагновый торф с рН $7,1 \pm 0,3$ и влажностью $80,0 \pm 1,0\%$, со степенью разложения – 10–15%. Торф получен с Усть-Бакчарского торфоместорождения (Томская обл., Чаинский район).

В исследовании использовали культуры высших базидиальных грибов штамм *Lentinus tigrinus* М-21 ВКПМ F-241 и *Pleurotus ostreatus* 813 ВКПМ F-276 (получены из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов – ВКПМ), которые в предварительно проведённых лабораторных экспериментах показали эффективность биоконверсии пшеничной соломы. Исследование разложения лигноцеллюлозных материалов базидиомицетами показало возможность их использования в технологиях переработки и утилизации труднодеградируемых отходов за счёт синтеза множества внеклеточных ферментов, принимающих участие в процессе модификации и разрушения лигнина. Солома – ценное органическое удобрение, однако имеет длительный период разложения, поэтому для лучшей утилизации предложено проводить её инокулирование, в том числе базидиальными грибами, обладающими высокой целлюлозолитической активностью [8].

Пшеничную солому собирали после уборки урожая, высушивали в естественных условиях, измельчали (2 см), промывали и проваривали в водопроводной воде (при $100\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч), смешивали с карбонатом кальция (7 г/кг соломы), раскладывали (20 г) по стеклянным чашкам Петри и стерилизовали (при $127\text{--}128\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин) дважды в автоклаве (Sanyo MLS-3020U, Panasonic). Агаровый блок (10 × 10 мм) с мицелием гриба (одного

из двух видов) помещали на подготовленный субстрат в чашку Петри. Срок биоконверсии соломы – 2 месяца при температуре $26\text{--}27\text{ }^\circ\text{C}$ (ТСО-1/80 СПУ).

Звено детритофагов было представлено эпигейными червями *Eisenia fetida*. По плодovitости они существенно превосходят другие виды дождевых червей, а также хорошо поддаются выращиванию в искусственных условиях. Полноценную среду обитания для них легко можно смоделировать в лабораторных условиях [9]. В начале эксперимента проводили отбор червей из маточной лабораторной культуры и их взвешивание.

Растительное звено было представлено листовым салатом (*Lactuca sativa* var. *crispa* сорт Кредо).

Субстраты готовили из торфа (80%), свежего бесподстильного навоза крупного рогатого скота (КРС) (10%) и распаренной стерильной пшеничной соломы (10%), прошедшей предварительную биоконверсию базидиомицетами, или без неё. Контроль – субстраты без добавления пшеничной соломы (торф/навоз в соотношении 9/1). Замешанные субстраты (800 г) помещали в непрозрачные полиэтиленовые контейнеры (2 л), в течение недели субстраты перемешивали, увлажняли при необходимости (по массе), выдерживали в темноте при комнатной температуре в целях улучшения процессов аэробной ферментации [10].

Спустя семь дней проводили перемешивание субстратов и в варианты с «вермикультивированием» интродуцировали дождевых червей (10 половозрелых особей/контейнер). Спустя семь дней после запуска червей (время акклиматизации червей) в субстраты высаживали пророщенные (4-дневные) семена салата (4 шт./контейнер).

Эксперименты проводили в климатической камере при интенсивности освещения – 8 кЛк (110 мкмоль квантов/(м² сек) ФАР), источник света – люминесцентные лампы (белый тёплый свет), с 12-часовым фото-периодом при $20\text{--}22/15\text{--}17\text{ }^\circ\text{C}$. На протяжении эксперимента поддерживали влажность субстрата 80–85% путём периодического увлажнения (по массе).

По окончании экспериментов у каждого растения измеряли высоту растений, количество листьев и рассчитывали площадь всех листьев (с помощью программы с открытым исходным кодом, распространяемой без лицензионных ограничений, ImageJ <https://imagej.nih.gov/ij/>), учитывали массу каждого

растения (сырую и сухую), рассчитывали продуктивность растений. После изъятия растений из субстрата, подсушивания в комнатных условиях и просева субстрата, проводили учёт количества и массы взрослых и ювенильных червей, количества коконов; рассчитывали массу и выход копролита в процентах к общей массе субстрата.

Агрохимический анализ субстрата включал определение обменного аммония (ГОСТ 27894.3-88) и нитратов (ГОСТ 27894.4-88), подвижных соединений фосфора (ГОСТ 27894.5-88) и калия (ГОСТ 27894.6-88), рН солевой вытяжки (ГОСТ 11623-89). Проводили анализ общего азота в растениях (ГОСТ 13496.4-2019), общего фосфора (ГОСТ 26657-97) и общего калия (ГОСТ 30504-97). Агрохимические анализы выполнены сотрудниками ЛАЦ (СибНИИСХИТ-филиал СФНЦА РАН, г. Томск).

Все эксперименты проводили в трёх независимых биологических повторностях. Данные, полученные в ходе экспериментов, представлены в виде средней арифметической величины с доверительным интервалом ($M \pm 95\% ДИ$) с учётом t -критерия Стьюдента для 95% уровня значимости для равномерно распределённых выборок и медианы ($M\tilde{e}$) для неравномерно распределённых или малочисленных выборок. Оценку статистической значимости различий полученных результатов проводили с учётом параметрического t -критерия Стьюдента ($p < 0,05$) для равномерных и непараметрического критерия Манна-Уитни ($p < 0,05$) для неравномерных выборок.

Результаты и обсуждение

В ходе модельного лабораторного эксперимента установлено, что наилучшие условия при культивировании растений салата обеспечивает торфонавозный субстрат (контроль): в системе без червей и с червями растения на торфонавозном субстрате были выше, имели большее количество листьев, большую сырую и сухую массу, продуктивность растений на данном субстрате выше по сравнению со всеми субстратами в эксперименте (табл. 1). В системах без интродукции червей отмечено увеличение продуктивности на торфонавозном субстрате в 1,5 раза по сравнению с субстратом, содержащим распаренную солому, а также в 6,9 раза и в 9,8 раза выше по сравнению с субстратами, содержащими биоконвертированную солому вёшенкой и пиллолистником, соответственно.

Известно, что продукты разложения соломы обладают значительной фитотоксичностью [6, 9], поэтому введение соломы в субстрат, особенно биоконвертированной, даже в количестве 10%, отрицательно сказалось на состоянии растений и их продуктивности. Возможно, подобное проявление негативных свойств связано как с более быстрым высвобождением фитотоксичных продуктов разложения соломы: в первую очередь, органических кислот, а также продуктов брожения, аммиака, солей, чья концентрация в процессе биодеградации сначала увеличивается, затем снижается [11], так и наличием, и накоплением в субстрате продуктов переработки и разложения мицелия гриба [12].

Введение в систему червей положительно влияло на рост и развитие растений, культивируемых на субстратах с внесением соломы: наличие червей в этих субстратах способствовало увеличению всех показателей почти в 2 раза, по сравнению с аналогичными показателями в системе без червей для субстратов, содержащих переработанную грибами солому. В то же время, введение червей в контрольный субстрат снижало продуктивность растений по сравнению с тем же субстратом без червей.

Интродукция червей в систему с ограниченным количеством питательных компонентов субстрата могла создать ситуацию, в которой черви вступали в конкурентные взаимоотношения с растениями, как поглощая и фиксируя минеральные компоненты в собственной биомассе, так и увеличивая численность и активность сопутствующей микробиоты, которая, наряду с вовлечённостью в процессы биотрансформации органических соединений, могла также конкурировать за их содержание с другими компонентами модельной системы, и способствовать увеличению количества промежуточных токсичных соединений деструкции соломы [13].

Известно, что дождевые черви оказывают комплексное положительное влияние на рост и развитие растений. В работе [14] описано влияние дождевых червей на урожайность, надземную и подземную биомассу различных растений: в среднем присутствие дождевых червей в агроэкосистемах приводит к увеличению урожайности на 25% и увеличению надземной биомассы на 23%. При этом эффект был вызван как прямым наличием дождевых червей в субстратах, на которых выращивали растения [15, 16], так и наличием в субстрате только производимого ими вермикомпоста [17, 18]. Известно стимулирующее влияние

Таблица 1 / Table 1

Параметры развития растений салата в лабораторном эксперименте при росте на торфонавозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоconverted соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей *Eisenia fetida* (*Mē*) / Vegetative growth parameters of lettuce plants in a laboratory experiment when growing on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing *Eisenia fetida* earthworms (*Mē*)

Субстрат Substrate	Высота, см Height, cm	Количество листьев, шт. Number of leaves, psc.	Площадь листовой поверхности, см ² Leaf surface area, cm ²	Масса сырая, г Fresh weight, g	Масса сухая, г Dry weight, g	Продуктивность, кг/м ² Productivity, kg/m ²
Без интродукции червей в субстраты / Without earthworms in substrates						
ТН / PM	25,075	18,0	513,45	13,15	0,56	3,25
ТН и солома (10%) PM and straw	21,012	15,5	358,84*	7,54	0,33	2,21*
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	12,637*	10,0*	86,83*	1,908*	0,084*	0,47*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	8,275*	10,5*	63,99*	1,34*	0,084*	0,33*
С интродукцией червей в субстраты / With introduction of earthworms in substrates						
ТН / PM	24,975	16,9	375,94	8,89 [^]	0,38 [^]	2,19 [^]
ТН и солома (10%) PM and straw	23,19	15,1	334,98	7,54	0,33	1,86
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	19,24* [^]	12,3* [^]	163,09* [^]	3,40*	0,15* [^]	0,84* [^]
ТН и пило- листник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	13,275* [^]	11,0*	106,00* [^]	2,16*	0,10*	0,53*

Примечание (здесь и далее в таблицах 2, 3, 4): * – статистическая значимость различий от торфонавозного субстрата (контроля) при $p < 0,05$; [^] – статистическая значимость различий от соответствующего субстрата без червей при $p < 0,05$.

Note (here and further in tables 2, 3, 4): * – differences with control (peat and manure substrate) are significant at $p < 0.05$; [^] – differences with the substrate without earthworms at $p < 0.05$.

продуктов жизнедеятельности дождевых червей и на пигментный состав растений. В работе [19] показано, что наличие в субстратах копролитов и экскретов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa*, *E. fetida*, *Lumbricus rubellus* увеличивает содержание пигментов в листьях огурцов и кукурузы. В работе [20]

отмечено положительное влияние червей *E. fetida* на биомассу горчицы *Brassica juncea* и содержание хлорофиллов и каротиноидов. В работе [17] показано, что присутствие червей *E. fetida* в субстрате способствовало значимому увеличению высоты и биомассы растений фасоли и содержанию хлорофилла *a*

и *b*. Таким образом, увеличение высоты, массы, площади листовой поверхности растений приводит к увеличению и фотосинтетической активности, следовательно, и к увеличению качества и количества продукции.

Присутствие червей в модельных системах с соломой, прошедшей биоконверсию макромицетами, оказало положительный эффект на растения. По-видимому, это связано с ускорением поглощения или разложения фитотоксичных компонентов биодegradации соломы и мицелия гриба.

Негативное влияние продуктов распада пшеничной соломы (соли уксусной, пропионовой и масляной кислот, накопление жирных кислот) известно достаточно давно и широко описано в литературе [6, 7, 11]. Уменьшение токсичности соломы для растений салата по нашему мнению связано как с непосредственным ускорением биодegradации соломы под действием пищевых ферментов червей, так и с возможным изменением видового состава микробиоты субстрата, способствующей более быстрой утилизации накапливающихся неорганических и органических кислот.

Внесение в торфоनावозный субстрат соломы оказало положительное влияние на червей (табл. 2): увеличилась плодовитость половозрелых особей, возросла численность коконов и ювенильных червей.

Внесение переработанной вёшенкой соломы способствовало наименьшей прибавке массы взрослых червей, при этом выход копролита был статистически значимо выше, чем во всех остальных субстратах. Внесение в субстрат распаренной соломы без предварительной биоконверсии способствовало интенсивной прибавке массы взрослых червей, значимому увеличению всех продукционных характеристик популяций червей, но выход копролита был ниже, чем в других субстратах (от 1,4 до 1,8 раза).

Исследования влияния различных отходов сельского хозяйства на популяции червей представлены в ряде работ [5, 21, 22]. В подавляющем числе работ приведена информация о выживаемости и изменении репродуктивной активности червей в экотоксикологических исследованиях. При этом данные о совместном культивировании растений с червями в условиях искусственных агроэкосистем опубликованы в небольшом количестве работ с достаточно противоречивыми результатами: в одних сообщается о повреждении корневой системы растений червями, а в других показаны положительные результаты взаимодействия червей и растений в условиях модельных систем [14, 16].

Использование отходов грибоводства в процессах вермикультивирования и вермикомпостирования *Eisenia fetida* показало

Таблица 2 / Table 2

Основные продукционные характеристики популяции дождевых червей *Eisenia fetida* в лабораторном эксперименте с растениями салата на торфоनावозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей (*Mē*)
 The main characteristics of *Eisenia fetida* population in a laboratory experiment with lettuce plants on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing earthworms (*Mē*)

Субстрат Substrate	Прибавка массы взрослых, г Weight gain in adults, g	Численность ювенильных особей червей, шт. Number of juvenile worms, psc.	Численность коконов, шт. Number of cocoons, psc.	Плодовитость взрослых особей, шт./взрослого червя Fecundity of adults, psc./adult worm	Выход копролита, % Worm casts, %
ТН / PM	0,031	33,0	35,5	6,85	14,5
ТН и солома (10%) PM and straw	0,040	57,5*	52,0*	11,0*	10,7
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,019*	47,5*	45,0*	9,25*	19,4*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,042*	66,0*	44,5	11,1*	14,0

Таблица 3 / Table 3

Содержание подвижных форм основных элементов питания в торфонавозном субстрате (ТН) в лабораторном эксперименте с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами до и после культивирования салата и интродукции червей *Eisenia fetida* ($M \pm 95\%$ ДИ) / The content of mobile forms of the nutrients in the peat and manure substrate (PM) in a laboratory experiment with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes before and after lettuce cultivation and introducing *Eisenia fetida* earthworms ($M \pm 95\%$ CI)

Субстрат Substrate	рН _{КСЛ}	Содержание подвижных форм элементов, мг/ 100 г а.с.в. субстрата The content of mobile forms of elements, mg per 100 g of substrate absolutely dry matter			
		N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O	K ₂ O
Исходные показатели субстратов / Initial substrate parameters					
ТН / PM	6,9±0,1	278±29	71±7	450±70	152±31
ТН и солома (10%) PM and straw	7,1±0,1	151±16	77±8	370±60	153±32
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,1±0,1	220±23	61±6	350±50	167±35
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> l on straw	7,1±0,1	199±21	80±8	300±40	133±28
Показатели субстратов после культивирования салата без добавления в систему червей Substrate parameters after lettuce cultivation without earthworms					
ТН / PM	7,2±0,1	56±10	222±28	475±90	59±16
ТН и солома (10%) PM and straw	7,1±0,1	63±9	124±19*	360±70*	101±21*
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,1±0,1	68±10	184±33	480±80	200±40*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	7,2±0,1	48±11	240±40	450±60	240±50*
Показатели субстратов после культивирования салата с введением в систему червей Substrate parameters after lettuce cultivation with introduction of earthworms					
ТН / PM	7,1±0,1	64±12	267±27 [^]	400±50	99±16 [^]
ТН и солома (10%) PM and straw	7,3±0,1	91±17* [^]	153±14* [^]	430±60	121±22
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,2±0,1	53±10 [^]	239±23 [^]	440±50	178±29*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	7,2±0,1	65±11 [^]	236±25	410±50	200±40*

их высокую эффективность [22]. В субстрате из мульчи от шампиньонов наблюдалась устойчивая динамика количественного роста червей. В субстрате из отходов от производства вешенок количество червей снижалось, и авторы предположили, что такой вид субстрата

должен разбавляться перегнившим навозом КРС или торфом.

Анализ подготовленных нами для экспериментов субстратов показал, что добавление соломы практически не изменяет содержание в субстратах нитрат-иона и калия, снижает со-

держание фосфора (почти в 1,5 раза) и ионов аммония (в 1,8 раз) (табл. 3). При биоконверсии соломы вёшенкой и пилолистником количество аммония увеличивается, однако остаётся ниже показателей торфонавозного субстрата (в 1,3–1,4 раза).

Анализируя субстраты после культивирования растений, обнаружено значительное снижение во всех субстратах аммиачного азота, что является естественным, поскольку данная форма азота как легко улетучивается из субстрата, так и переходит в органическое вещество первичных продуцентов [13]. Отмечено также увеличение нитратного азота в субстратах (почти в три раза), что может являться следствием процессов трансформации органического вещества, содержащегося в субстрате навоза [23]. Обнаружено незначительное увеличение фосфора в торфонавозной смеси и с добавлением в субстрат распаренной соломы, и значительное (в 1,3–1,4 раза) его увеличение в субстратах с внесением биоконвертированной грибами соломы по сравнению с исходным субстратом. Содержание калия в торфонавозном субстрате упало в 2,6 раза, в субстрате с введением распаренной соломы – в 1,5 раза, в субстрате с вёшенкой оно незначительно повысилось по сравнению с исходными показателями, а в субстрате с пилолистником увеличилось почти в 2,1 раза.

Интродукция червей в модельные экосистемы показала схожее содержание подвижных форм основных элементов в субстрате, что и в системах без червей. Содержание аммиачного азота уменьшилось, нитратного – увеличилось ещё более значимо. Содержание фосфора в торфонавозном субстрате снизилось по сравнению с содержанием в исходном субстрате, а в субстратах с внесением соломы – увеличилось. Содержание калия в субстрате с переработкой соломы пилолистником статистически значимо ($p < 0,05$) увеличилось по сравнению с содержанием в исходном субстрате, и было в 2 раза выше, чем в торфонавозном субстрате.

В исследовании [22] также показано, что вермикультивирование *E. fetida* на отходах грибоводства увеличило массовую долю азота практически в 2 раза, массовая доля золы в субстрате от производства вёшенок увеличилась в 3 раза, а в субстрате от производства шампиньонов – в 6,6 раза.

Анализ содержания в биомассе растений основных биогенных элементов показал, что у растений, выращенных на субстратах с соломой, отмечается более высокое содержание общего азота в листовой пластине (табл. 4). Наибольшее содержание азота отмечено для растений в вариантах с соломой, прошедшей биоконверсию вёшенкой (в 1,3 раза выше содержания данного элемента в растениях в вариантах без внесения соломы). В данном

Таблица 4 / Table 4

Содержание в биомассе растений салата основных элементов питания в лабораторном эксперименте на торфонавозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей *Eisenia fetida* ($M \pm 95\%$ ДИ)
The content of the main nutrients in the lettuce biomass in a laboratory experiment on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing *Eisenia fetida* earthworms ($M \pm 95\%$ CI)

Субстрат Substrate	Содержание элементов, % / Content of elements, %		
	Общий азот Total nitrogen	Общий фосфор Total phosphorus	Общий калий Total potassium
Без интродукции червей в субстрат / Without earthworms in substrates			
ТН / PM	0,57±0,05	1,25±0,14	7,78±0,48
ТН и солома (10%) / PM and straw	0,66±0,06*	1,16±0,15	8,00±0,32
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,74±0,03*	1,40±0,06*	8,14±0,19
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,62±0,03	1,19±0,07	7,71±0,21
С интродукцией червей в субстрат / With introduction of earthworms in substrates			
ТН / PM	0,63±0,06	1,26±0,16	8,45±0,33^
ТН и солома (10%) / PM and straw	0,68±0,03	1,19±0,13	8,27±0,25
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,74±0,03*	1,04±0,08*^	8,50±0,20^
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,78±0,03*^	1,41±0,08^	8,60±0,23^

варианте выращивания также отмечено увеличение содержания в растениях фосфора. Имелась тенденция к увеличению содержания калия в растениях при их культивировании на субстратах, содержащих солому.

Интродукция червей оказала влияние на процессы накопления основных биогенных элементов в растениях. Содержание общего азота увеличилось по сравнению с системами без червей, содержание фосфора в торфяно-возном субстрате и с внесением соломы осталось на таком же уровне, а вот выращенных на субстрате с вёшенкой было статистически значимо ($p < 0,05$) ниже по сравнению с тем же субстратом, но без червей, и статистически значимо ниже, чем в аналогичной системе в торфяно-возном субстрате. Содержание фосфора у растений на субстрате с соломой, прошедшей биоконверсию пилолистником, статистически значимо увеличилось в присутствии червей. В растениях в системах с интродукцией дождевых червей также отмечено большее содержание ионов калия.

Заключение

Таким образом, в ходе модельных экспериментов отмечено наличие фитотоксичного эффекта продуктов разложения пшеничной соломы на растения салата. Предварительная переработка соломы в вариантах без дождевых червей не оказала положительного эффекта на продуктивность растений, но при этом оказала благоприятное действие на популяционные характеристики червей. Несмотря на неэффективность самого приёма предварительной биоконверсии пшеничной соломы мицелием базидиомицетов для повышения продуктивности растений в модельной системе, можно рекомендовать включение отходов грибоводства, например, субстратов после получения плодовых тел вёшенки [24], в системы продукции зелёных культур в случае присутствия в них дождевых червей, значительно снижающих фитотоксичность таких субстратов. Выращивание растений салата на субстратах, содержащих солому, прошедшую биоконверсию пилолистником тигровым и вёшенкой устричной, в модельных системах с дождевыми червями благоприятно сказывается на минеральном составе растений: увеличивается содержание основных биогенных элементов в растительной ткани.

Исследование выполнено в рамках госада-ния FNUU-2021-0005.

References

1. Nelson M., Pechurkin N.S., Allen J.P., Somova L.A., Gitelson J.I. Closed ecological systems, space life support and biospherics // *Environmental Biotechnology. Handbook of Environmental Engineering*. V. 10 / Eds. L.K. Wang, V. Ivanov, J.-H. Tay. New York: Humana Press, 2009. P. 517–565. doi: 10.1007/978-1-60327-140-0_11
2. Somova L.A., Pisman T.I., Pechurkin N.S. Simple artificial ecosystems for environmental objectives // *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2018. V. 88. No. 1. P. 72–78 (in Russian). doi: 10.7868/S0869587318010097
3. Braga L.P., Yoshiura C.A., Borges C.D., Horn M.A., Brown G.G., Drake H.L., Tsai S.M. Disentangling the influence of earthworms in sugarcane rhizosphere // *Sci. Rep.* 2016. No. 6. Article No. 38923. doi: 10.1038/srep38923
4. Shirokikh A.A., Zlobina Yu.A., Shirokikh I.G. Biodegradation of vegetable waste and obtaining fruit bodies in cultivation of *Hericium erinaceus* // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-086-092
5. Tereshchenko N.N. Ecological and microbiological aspects of vermicultivation. Novosibirsk: Publishing House of SB RAAS, 2003. 113 p. (in Russian).
6. Harper S.H.T., Lynch J.M. The role of water-soluble components in phytotoxicity from decomposing straw // *Plant and Soil*. 1982. No. 65. P. 11–17. doi: 0032-079X/82/010011-7500.20/0
7. Bi Y.M., Tian G.L., Wang C., Feng C.L., Zhang Y., Zhang L.S., Sun Z.J. Application of leaves to induce earthworms to reduce phenolic compounds released by decomposing plants // *Eur. J. Soil Biol.* 2016. No. 75. P. 31–37. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.007
8. Kulikova N.A., Klein O.I., Stepanova E.V., Korableva O.V. Use of basidiomycetes in industrial waste processing and utilization technologies: fundamental and applied aspects (Review) // *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*. 2011. V. 47. No. 6. P. 619–634 (in Russian).
9. Shashurina E.A., Pominchuk Y.A., Redkova L.A. A bioassay in determining the suitability of silt substrate for use as fertilizer // *Vestnik RGATU*. 2019. No. 2 (42). P. 52–57 (in Russian).
10. Lyashchev A.A., Prok I.A. Effect of vermicompost extract on preparation of substrate from horse manure for vermiculture // *Agro-Food Policy in Russia*. 2018. No. 5 (77). P. 36–41 (in Russian).
11. Jagadabhi P.S., Wani S.P., Kaushal M., Patil M., Vemula A.K., Rathore A. Physico-chemical, microbial and phytotoxicity evaluation of composts from sorghum, finger millet and soybean straws // *Int. J. Recycl. Org. Waste in Agricult.* 2019. V. 8. P. 279–293. doi: 10.1007/s40093-018-0240-8
12. Liu Q., Kong W., Cui X., Hu S., Shi Z., Wu J., Zhang Y., Qiu L. Dynamic succession of microbial compost communities and functions during *Pleurotus ostreatus* mushroom cropping on a short composting substrate //

Front. Microbiol. 2022. V. 13. Article No. 946777. doi: 10.3389/fmicb.2022.946777

13. Zheng Y., Wang S., Bonkowski M., Chen X., Griffiths B., Hu F., Liu M. Litter chemistry influences earthworm effects on soil carbon loss and microbial carbon acquisition // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 123. P. 105–114. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.05.012

14. Van Groenigen J., Lubbers I., Vos H.M.J., Brown G.G., De Deyn G.B., van Groenigen K.J. Earthworms increase plant production: a meta-analysis // Sci. Rep. 2014. No. 4. Article No. 6365. doi: 10.1038/srep06365

15. Blouin M. Chemical communication: An evidence for co-evolution between plants and soil organisms // Appl. Soil Ecol. 2018. V. 123. P. 409–415. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.10.028

16. Jana U., Barot S., Blouin M., Lavelle P., Laffray D., Repellin A. Earthworms influence the production of above- and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana* // Soil Biol. Biochem. 2010. V. 42. P. 244–252. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.10.022

17. Belmeskine H., Ouameur W.A., Dilmi N., Aouabed A. The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. // Heliyon. 2020. V. 6. No. 8. Article No. e04679. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04679

18. Djajadi D., Syaputra R., Hidayati S.N., Khairiyah Y. Effect of vermicompost and nitrogen on N, K, Na uptakes and growth of sugarcane in saline soil // AGRIVITA. Jour-

nal of Agricultural Science. 2020. V. 42. No. 1. P. 110–119. doi: 10.17503/agrivita.v41i0.2364

19. Bityutskii N.P., Kaidun P.I. The influence of earthworms on the mobility of microelements in soil and their availability for plants // Pochvovedenie. 2008. V. 41. No. 12. P. 1479–1486 (in Russian).

20. Kaur P., Bali S., Sharma A., Vig A.P., Bhardwaj R. Effect of earthworms on growth, photosynthetic efficiency and metal uptake in *Brassica juncea* L. plants grown in cadmium-polluted soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. P. 13452–13465. doi: 10.1007/s11356-017-8947-z

21. Biabani A., Carpenter-Boggs L., Gholizadeh A., Vafaie-Tabar M., Omara M.O. Reproduction efficiency of *Eisenia foetida* and substrate changes during vermicomposting of organic materials // Compost Sci. Util. 2018. V. 26. No. 3. P. 209–215. doi: 10.1080/1065657X.2018.1463877

22. Sazonova I.A., Azizov I.R., Yakovleva N.A. Estimation of the efficiency of use of waste from mushroom in the processes of vermiculturation and vermicomposting // Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2022. No. 4. P. 44–47 (in Russian). doi: 10.28983/asj.y2022i4pp44-47

23. Na L., Abail A., Whalen J.K., Liang B., Hu C., Hu R., Wu Y. Earthworms increase nitrogen uptake by lettuce and change short-term soil nitrogen dynamics // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 176. Article No. 104488. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104488

24. Ivanov A.I. Environmental aspects of the development of mushroom production in Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-006-012

Перспективы развития водородной энергетики на региональном примере

© 2024. А. М. Опарина, инженер, аналитик,
И. В. Ильин, д. э. н., директор ВШБИ, зав. лабораторией,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
e-mail: annaoparina93@gmail.com

В связи с происходящими изменениями климата, важным фактором развития мировой энергетики является снижение её углеродного следа. Водородная энергетика может стать ответом на вопрос о переходе к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. Статья содержит аналитический обзор перспективных методов производства водорода на примере региона – Саратовской области, его потенциальных потребителей в реальной и долгосрочной перспективе. Обзорный материал отобран при помощи анализа научных статей, опубликованных в различных базах данных, электронных библиотеках научных изданий и статей средств массовой информации, опубликованных в сети Интернет. Сделан вывод, что водород, произведённый в Саратовской области, в большей степени будет потребляться на этой же территории. Производство фосфатных удобрений и утилизация водородсодержащих газов в процессе реформинга нефти станут драйверами развития водородной энергетики в регионе. В долгосрочной перспективе развитие получит использование водорода в качестве топлива, а высокотехнологичный автономный водородный энергетический комплекс, который можно реализовать на Балаковской АЭС, будет способен производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки на энергосистему. Отмечено, что Саратовская область имеет потенциал к производству биоводорода, получаемого путём переработки отходов сельского хозяйства. Государственные меры стимулирования производителей и потребителей водорода в регионе сыграют решающую роль в повышении и эффективности развития водородной энергетики в Саратовской области.

Ключевые слова: водородная энергетика, альтернативная энергетика, водород, биоводород, перспективы использования водорода, Саратовская область.

Prospects of hydrogen energy development based on a regional example

© 2024. А. М. Опарина ORCID: 0000-0002-2043-1866
I. V. Ilyin ORCID: 0000-0002-1834-4894
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia, 195251,
e-mail: annaoparina93@gmail.com

In connection with ongoing climate change, an important factor in the development of the global energy is reducing its carbon footprint. Hydrogen energy may be the answer to the transition to environmentally friendly and resource-saving energy. The article presents an analytical review of promising methods of hydrogen production on the example of the Saratov region, as well as its potential consumers in the real and long term. The review content was selected by analyzing scientific articles published in various databases, electronic scientific libraries and media articles published on the internet. It was concluded that hydrogen produced in the Saratov region will be consumed to a greater extent in the same territory. The production of phosphate fertilizers and the utilization of hydrogen-containing gases in the oil reforming process will be the drivers of hydrogen energy development in the region. In the long term, the use of hydrogen as fuel will be developed. A high-tech autonomous hydrogen energy complex implemented at the Balakovo NPP will be capable of producing and supplying electricity to the electric power system during in the peak hours. It is noted that the Saratov region has the potential to produce biohydrogen obtained by processing agricultural waste. State measures to stimulate hydrogen producers and consumers in the region will play a decisive role in increasing the efficiency of hydrogen energy development in the Saratov region.

Keywords: hydrogen energy, alternative energy, biohydrogen, hydrogen, prospects for the use of hydrogen, Saratov region.

В настоящее время изменение климата является главным фактором, привлекающим внимание при обсуждении внесения изменений в повестку мировой экономики и энергетики. Снижение роста глобального потепления и выброса парниковых газов, переход к возобновляемым источникам энергии и в целом к зелёной энергетике является приоритетной задачей мирового сообщества.

Одним из приоритетов государственной энергетической политики Российской Федерации, изложенным в Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г., является переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике [1], которой является водородная энергетика.

Развитие водородной энергетики в России регулирует Концепция развития водородной энергетики в РФ, в которой говорится о водороде как об источнике накопления, хранения и доставки энергии, перспективном энергоносителе и инструменте для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат. Среди основных преимуществ водорода выделяют возможность его получения из различных источников и отсутствие выбросов углекислого газа при использовании в качестве энергоносителя [2].

К 2050 г. роль водорода в мировом энергетическом секторе может оказаться сопоставима с ролью, которую сейчас играет ископаемое топливо, кроме того, это один из наиболее эффективных способов создания долгосрочных хранилищ энергии [3].

Перспективными областями применения водорода как энергоресурса являются производство тепло- и электроэнергии, транспортная отрасль, промышленное и бытовое применение, однако водородные технологии характеризуются высокой стоимостью, средним уровнем развития и сложностями с безопасностью его прямого использования и хранения. На сегодняшний день водород в РФ занимает третье место среди наиболее востребованных в промышленности газов, уступая в количественном отношении азоту и кислороду, при этом его выработка чаще зациклена применением на тех же предприятиях-производителях, исключая возможные поставки другим потенциальным потребителям [4]. Исходя из вышесказанного, важным фактором для развития водородной энергетики в регионах является поиск непосредственных потребителей конечного продукта в разумной доступности от производителя и налаживание

логичных путей его транспортировки, ведь стоимость водорода в значительной степени удорожает именно она.

Одной из ключевых мер, способствующих развитию водородной энергетики в РФ, будет создание и развитие водородных промышленных и технологических кластеров и реализация пилотных проектов производства и экспорта низкоуглеродного водорода. Так, проектируются три производственных кластера: Северо-Западный, Восточный и Арктический. В качестве дополнения к ним может быть дополнительно создан Южный кластер, который будет использовать в качестве источника ресурсов природный газ, потенциал в области возобновляемых и других источников энергии с низким уровнем выбросов углекислого газа, регионов юга РФ. Кластер обладает непосредственной близостью к крупным экспортным портам, к нему относятся и Саратовская область [2].

Цель данного исследования заключается в анализе перспектив развития низкоуглеродной водородной энергетики на примере региона Нижнего Поволжья – Саратовской области.

Объекты и методы исследования

Предварительные поисковые исследования не привели к нахождению публикаций, удовлетворяющих цели исследования, поэтому на основании анализа и сравнения различных источников литературных данных решено провести экспертную оценку перспектив развития низкоуглеродной водородной энергетики на примере Саратовской области, определить основных возможных производителей водорода, а также его потребителей на заданной территории.

Материал для научного обзора отобран при помощи анализа научных статей, опубликованных в различных базах данных Scopus, Google Scholar, электронных библиотеках научных изданий eLIBRARY и КиберЛенинка. Поиск актуальных данных, отвечающих требованиям запроса, был проведён среди новостных статей средств массовой информации, опубликованных в сети Интернет, которые обладали достоверностью информации. Основная часть рассматриваемого нами материала относилась к публикациям, срок издания которых ограничивался 2019–2024 гг. Однако некоторые материалы, представляющие большой интерес для нас, датированы 2012–2018 гг.

Поиск осуществлялся по ключевым словам: «водородная энергетика + Саратовская область», «водород + Саратовская область», «биоводород + Саратовская область», «энергетическая политика + Саратовская область». Аналогично проведён поиск с использованием словосочетаний: «hydrogen energy + Saratov region», «hydrogen + Saratov region», «biohydrogen + Saratov region», «energy policy + Saratov region».

Аналогичные методики поиска материалов для аналитических обзорных статей использовались в различных опубликованных работах [4–6].

Результаты и обсуждение

В результате сгорания водорода в качестве побочного продукта образуется вода, что говорит об экологической чистоте его использования [7]. С точки зрения оказанного воздействия на окружающую среду (ОС) способ получения водорода играет большую роль. Наиболее используемый метод получения водорода представляет собой паровой риформинг природного газа, при котором природный газ реагирует с паром при высокой температуре и давлении в присутствии катализатора, что приводит к образованию водорода и большого количества углекислого газа. Достаточно энергоёмким способом получения водорода (большое количество электроэнергии и воды) является электролиз воды – разложение воды на водород и кислород при помощи электрического тока. Для получения водорода также используют газификацию, термохимические и фотохимические процессы, которые, однако, дают его низкую концентрацию [8].

По способам получения водород разделяют на цветовые градации: зелёный – производится из возобновляемых источников энергии методом электролиза воды, голубой – производится из природного газа, а вредные отходы улавливаются для вторичного использования, розовый или красный – произведённый при помощи атомной энергии, серый – получают путём конверсии метана, коричневый – получают в результате газификации угля [9, 10]. При этом около 99% производимого мировой промышленностью водорода относится к серому и голубому, что подразумевает под собой большие выбросы углерода в атмосферу. Зелёный или низкоуглеродный водород должен в долгосрочной перспективе занять лидирующие позиции в масштабах производ-

ства, если мы хотим говорить о водороде как о низкоуглеродном энергетическом ресурсе.

По данным анализа рынка водорода в России, проведённого компанией Агроан, в 2022 г. произведено 2 360 133 тыс. м³ водорода, а с января по июль 2023 г. – 1 349 020 тыс. м³ водорода, что на 0,8% выше показателей предыдущего года за эти же месяцы. Лидером в 2023 г. стал Приволжский федеральный округ с долей 78,5% от общего объёма водорода, произведённого в России [11].

Перспективы производства водорода на территории Саратовской области. Производство водорода в Саратовской области, прежде всего, связано с химической отраслью промышленности. В регионе большое развитие получило производство химических источников тока (топливные элементы (ТЭ) и аккумуляторы). На территории Саратовской области располагаются два крупнейших завода по производству аккумуляторов. Один из них – это первый построенный в СССР завод, занимающийся изготовлением щелочных аккумуляторов – ООО «Завод автономных источников тока», который был построен ещё в 1931 г. В 1959 г. на базе предприятия был создан Научно-исследовательский институт химических источников тока (НИИХИТ), который занимался разработкой инновационных технологий производства аккумуляторов. Завод является основным российским производителем щелочных никель-кадмиевых аккумуляторов и батарей для городского электротранспорта, железных дорог, метрополитена, районных и сельских узлов связи, речных и морских судов. Второй – Саратовский аккумуляторный завод АО «Электроисточник» – один из старейших заводов России по производству свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов, основанный в 1929 г. Предприятие выпускает широкий ассортимент аккумуляторной продукции для автомобилей, автобусов, автотракторной техники. В перспективе на данных предприятиях возможным станет производство ТЭ, работающих на водороде, которые будут кроме того основным трансформатором водорода в электрическую энергию.

Работа водородных ТЭ основана на том, что химическая энергия атомов водорода в них способна превращаться в электрическую. Электрический ток, воздействуя на ионы водорода, приводит к соединению их с кислородом, на выходе образуя только воду и выделенное тепло. Коэффициент полезного действия таких ТЭ может достигнуть значения 80%. Установка таких генераторов в автомобиле –

перспективное направление развития существующих электромобилей. В итоге новые водородомобили не будут нуждаться в зарядке от электросетей [12].

На данный момент промышленно на рынке существуют водородомобили следующих марок: Toyota Mirai, Honda Clarity, Ford Airstream, Mercedes-Benz GLC F-CELL, BMW Hydrogen 7. Водород в них находится в топливном баке в сжатом виде под давлением 400 атмосфер. Водородомобили, которые производят сегодня, расходуют в среднем 0,8–1,0 кг водорода на 100 км пути. Цена одного килограмма водорода начинается с 8–10 евро. С энергетической точки зрения это эквивалентно шести литрам бензина. В России с 2029 г. КАМАЗ планирует выпускать грузовые автомобили с водородными ТЭ, первые прототипы которых представляли в 2021 г. на выставке в Москве: водоробус на базе «КАМАЗ-6290» и 44-тонный прототип грузовика, имеющий систему водородных ТЭ мощностью 170 кВт (две батареи по 85 кВт) [13].

Таким образом, Саратовская область, имея на своей территории большой производственный задел в виде АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока», могла бы стать фундаментом для производства ТЭ, которые применяются на водородомобилях, несмотря на то, что сейчас это может казаться неосуществимым будущим, так как на данный момент водородные автомобили, как и водородные заправочные станции, находятся на уровне научных разработок и пилотных проектов.

Одним из наиболее экономически эффективных способов получения низкоуглеродного водорода является его централизованное производство при помощи паровой конверсии метана, водород, произведённый данным методом, стоит около 0,8 долларов за килограмм. Также широко используют метод газификации угля с обеспечением улавливания углекислого газа, конечная стоимость водорода в этом случае увеличивается на 25–30%, и электролиз воды на базе электроэнергии атомной электростанции (АЭС) и гидроэлектростанции [2].

Согласно оценкам учёных из Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), на текущий момент наименее затратным способом производства водорода является паровая конверсия метана (1,7 долл./кг) [14].

В системах атомной энергетики водород можно производить минимизируя вредные атмосферные выбросы. На территории Саратовской области расположена Балаковская

АЭС – крупнейший в России производитель электроэнергии, на которой вырабатывается более 30 млрд кВт·ч ежегодно, на станции эксплуатируются реакторы типа ВВЭР-1000 (проект В-320). Увеличение доли АЭС может привести к необходимости их разгрузки – поиску потребителей. Обычно для базисной электрической нагрузки АЭС используют гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), что влечёт дополнительные технические, экономические, энергетические, экологические проблемы и геологические, сейсмические, гидрологические риски и ущербы. Это влияет на стоимость пиковой электроэнергии ГАЭС и её конкурентоспособность, ввиду этого разрабатываются альтернативные технологии аккумулирования электроэнергии, например, производство водорода за счёт ночной избыточной электроэнергии путём создания водородного энергетического комплекса, выработанные водород и кислород которых могут также реализовываться как товарная продукция [15].

Разработан автономный водородный энергетический комплекс, способный производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки [16]. При этом водород, получаемый электролизом в часы снижения электрической нагрузки в энергосистеме, сжигается в кислороде. Для надёжной работы основной паровой турбины энергоблока АЭС образующийся при сжигании водородного топлива пар подаётся в дополнительную паровую турбину, которая может использоваться для обеспечения электроэнергией потребителей и собственных нужд АЭС при обесточивании. Разработка основана на экспериментальных данных Балаковской АЭС (Саратовская область) и подразумевает использование остаточного тепла реактора для выработки пара, который будет служить рабочим телом для маломощной паротурбинной установки. При этом работа водородного комплекса будет характеризоваться следующими параметрами: внепиковое энергопотребление – 11 МВт; потребление электроэнергии во внепиковое время – 273 МВт·ч; количество водорода, вырабатываемого в непиковое время работы электрических нагрузок, – 6191 кг; располагаемый массовый расход водорода в часы пик электрических нагрузок, – 0,29 кг/с; объём водорода (хранение под давлением 4,2 мВт) – 1899 м³; объём кислорода (хранение под давлением 4,2 мВт) – 900,1 м³ [16].

Перспективы производства биоводорода в Саратовской области. В основу оценки тех-

нологий водородной энергетики с учётом их длительного влияния на ОС должен входить объём всех выбросов углекислого газа за весь период цикла использования водородных энергоносителей. С этой точки зрения правилам низкоуглеродной экономики отвечает водород, полученный с использованием технологий, имеющих низкий углеродный след, таким является биоводород.

Согласно ГОСТ Р 57079-2016, в России термин биоводород определён как водород, произведённый из биомассы и/или из разлагаемой фракции отходов, предназначенный для использования в качестве биотоплива. Биоводород может быть получен при помощи различных процессов: бескислородного фотосинтеза, ферментации, кислородного фотосинтеза, биосинтеза водорода цианобактериями с помощью комплекса ферментов нитрогеназы. Интегративные перспективы методов тёмной ферментации хорошо известны, однако реже используются промышленностью [3].

Анализ развития альтернативной энергетики в Саратовской области, проведённый нами ранее, показал, что на данной территории наиболее развито использование солнечной энергии, что связано с характерными климатическими условиями, однако, ввиду высокого образования органических отходов в данном регионе, рационально применять биомассу в качестве источника биоэнергии, например, для получения биоводорода [17].

Наиболее перспективным методом производства биоводорода является получение водорода из биомассы и жидких органических отходов [18–20]. Разработано три основных способа получения биоводорода из биомассы:

- 1) получение биоводорода за счёт риформинга биогаза из биомассы органических отходов, с очисткой попутного CO_2 ;
- 2) получение биоводорода при термофильном сбраживании биомассы органических отходов;
- 3) получение биоводорода из биомассы микроводорослей за счёт биофотоллиза воды.

В работе [8] описана технология получения биоводорода из микроводорослей после использования их в очистке сточных вод предприятий пищевой промышленности при одновременном удалении высокого уровня диоксида углерода из воздуха. Максимальное количество биоводорода (44,24 мл/л суспензии) получено в условиях анаэробного тёмного брожения.

Сельскохозяйственные отходы являются одним из доступных материалов для произ-

водства биоводорода [21]. Максимальное содержание по метану в биогазе было выделено при переработке отходов растениеводства (свекольной ботвы, овощных отходов), а также навоза от животноводческих комплексов и птицефабрик [22].

Сельскохозяйственная специализация Саратовской области определена производством растениеводческой продукции, среди которой важнейшими культурами являются зерновые (пшеница, ячмень, овёс), подсолнечник, картофель, свёкла, морковь, овощи и бахчевые. При этом валовый сбор зерновых и зернобобовых культур в хозяйствах всех категорий составил в 2023 г. 5925,2 тыс. т, подсолнечника – 2104,4 тыс. т, овощей открытого и закрытого грунта – 371,4 тыс. т, сахарной свёклы – 622,4 тыс. т, картофеля – 152,4 тыс. т [23]. Это говорит о значительных объёмах вырабатываемой растениеводческой продукции в регионе, что предполагает образование большого количества отходов её переработки. По данным доклада о состоянии и об охране ОС Саратовской области, в 2022 г. на территории региона образовалось 276,4 тыс. т отходов категории «растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг в этих областях», что составляет 4% от общего количества всех отходов производства и потребления [24].

Таким образом, ресурсный потенциал для производства биоводорода из отходов сельского хозяйства, стоимость которых составят для предприятия-производителя только расходы на транспортировку, при условии её необходимости, в Саратовской области является высоким.

Потенциальные потребители водорода в Саратовской области. Потребление водорода в Саратовской области, как и его производство, связано со следующими отраслями промышленности:

- химическая и нефтехимическая промышленность (ПАО «Саратовский НПЗ», ООО «Завод автономных источников тока», ООО «Саратоворгсинтез», Балаковский филиал АО «Апатит», ОАО «Балаковорезинотехника»);
- машиностроение и металлообработка (АО «Саратовский аккумуляторный завод (Электроисточник)», ООО «Завод автономных источников тока», АО «Трансмаш», ЗАО «Промэлектроника»);
- топливная промышленность (ПАО «Саратовнефтегаз», ООО НК-САРАТОВ-НЕФТЕГАЗДОБЫЧА, ООО «Газпром трансгаз Саратов»);

– пищевая промышленность (ООО «Рус-агро-Саратов»; ООО «Русагро-Балаково»; ООО «Русагро-Аткарск»; ООО Комбинат «Дубки»).

Нужды химической промышленности в водороде обусловлены производством аммония и метанола, хлорно-щелочным производством. В нефтепереработке водород применяется для повышения глубины переработки и производства светлых нефтепродуктов, уменьшения токсичности, удаления серы и других загрязняющих веществ. Цветная металлургия благодаря применению водорода получает металлы особой чистоты из оксидов, а кислородно-водородные горелки используют для сварочных и резочных работ с металлами. Смеси монооксида углерода с водородом используют в синтезе аммиака, метилового спирта, получения парафинов, олефинов, в оксосинтезе. Пищевая промышленность при помощи водорода может заниматься превращением жидких жиров в твёрдые и гидрогенизировать их, также водород используется при проверке герметичности упаковки пищевых продуктов [25].

В России большая потребность в водороде заключена в производстве химических продуктов, в частности аммиака и метанола [14]. При производстве же «голубого» аммиака обязательно улавливается выделяющийся в процессе его получения побочный продукт – углекислый газ. «Голубой» аммиак является сырьём для экологически чистого водорода, когда аммиак получают с применением природного газа (в некоторых случаях угля), что является более «зелёной» формой получения энергии благодаря улавливанию и связыванию углерода. Производство «голубого» аммиака методом паровой конверсии метана с улавливанием CO_2 планирует запустить в Саратовской области (п. Михайловский) проектная компания «СПК Горный» – дочерняя организация московского ООО «НПП Платекс». Компания ООО «НПП «Платекс» совместно с ООО «СПК «Горный» реализовывает инвестиционный проект «Строительство завода по производству минеральных удобрений на базе имущественного комплекса ФКП «Горный», чья реализация основывается на необходимости вовлечения в хозяйственный оборот имущественного комплекса бывшего объекта по уничтожению химического оружия «Горный». Общий объём инвестиций в проект оценивается в 1 млрд. долларов. На предприятии планируется производить 2100 т аммиака, 3300 т карбамида и 500 т «голубого» аммиака в сутки [26]. «Голубой» аммиак относится к

низкоуглеродным видам топлива, значитель-но снижающим воздействие на ОС и климат, благодаря улавливанию побочного продукта его производства – диоксида углерода (CO_2). Пилотный запуск производства планируется к 2026 г. Целевыми рынками поставки производимого «голубого» аммиака станет внутренний рынок России и страны Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Прогнозный объём производства в 2026 г. – 20 000 т аммиака в год, а в 2030 г. – 170 000 т аммиака в год. На данный момент схема проекта представляет собой следующую цепочку: паровая конверсия метана с производством «голубого» аммиака из природного газа – улавливание и утилизация CO_2 с помощью микроводорослей – логистика с транспортировкой водорода заказчиком на территории России, в страны Европы и АТР – потребление за счёт долгосрочных контрактов с заказчиками на территории России, в странах Европы и АТР [27].

Химические источники тока можно применять в качестве экологически чистого энергоносителя для автомобильной промышленности. Однако, одним из недостатков их использования является ёмкость матрицы, которая не способна обеспечить продолжительную работу устройства в автономном режиме. Решение этой проблемы – применение водородных соединений металлов в качестве катодов для химических источников тока [28].

Существующая инфраструктура саратовских предприятий (АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока») по производству химических источников тока (аккумуляторов) позволит с минимальными капитальными затратами организовать выпуск водородных ТЭ, которые будут иметь спрос для автомобилей на водородном топливе.

В некоторых европейских странах водород смешивают с природным газом в небольших безопасных количествах при добавлении в существующие газотранспортные и газораспределительные сети подачи природного газа [29]. В Саратовской области ведётся добыча нефти и газа, основные компании – это ООО «ДИАЛЛ АЛЪЯНС», ООО «ННК-Саратовнефтегаздобыча», ПАО НК «РуссНефть». Данные предприятия являются крупными поставщиками природного газа, для повышения энергетической ёмкости производимой газовой смеси возможна добавка в неё водорода. Применение данной технологии на нефтегазовых предприятиях Саратовской области позволит повысить энергетические характеристики подаваемого в сети газа.

ПАО «Саратовский НПЗ» ещё в 2014 г. ввёл в эксплуатацию установку короткоцикло-вой адсорбции водорода (КЦА), максимальная производительность которой достигала 4000 м³ в час. Чистота вырабатываемого на ней водорода составила 99,9%. Этот водород использовали в установках по изомеризации и риформингу бензина, которые увеличивают цикл работы установленных на них катализаторов. Данная установка способна производить разделение газовой смеси на водород высокой частоты, азот, кислород, метан, этилен и другие компоненты. Внедрённую инновационную разработку произвело ОАО «Криогенмаш», в её состав вошли 2 полволоконных мембранных газоразделительных модуля компании «UBE», при этом расход электроэнергии во время работы не превышает 0,5 кВт в час, что повышает экологические характеристики подобного производства [30, 31]. ПАО «Саратовский НПЗ» является как перспективным производителем водорода, так и уверенным его потребителем.

Но основе поиска на тендерных площадках России, ЕИС Закупки, Ростендер, Контур Закупки, выявлены следующие промышленные предприятия Саратовской области, которые участвовали в закупках газообразного водорода в 2024 г.: это ПАО «Саратовский НПЗ» (40 л) и БФ АО «Апатит» (42 м³), что подтверждает наличие потенциальных потребителей водорода в описываемом регионе.

Заключение

Ввиду того, что хранение и длительная транспортировка больших объёмов газообразного водорода затруднена и экономически не выгодна, произведённый в Саратовской области водород в большей степени будет потребляться на этой же территории, а крупнейшие производители водорода станут одновременно и его основными потребителями.

В Саратовской области химическая и нефтеперерабатывающая промышленность отличается высоким развитием, в виду этого все описанные выше инновационные методы производства и потребления водорода имеют большой потенциал для реализации в данном регионе. Так, производство фосфатных удобрений и утилизация водородсодержащих газов в процессе риформинга нефти станут настоящими драйверами развития водородной энергетики в регионе. Крупный инвестиционный проект «СПК «Горный» – завод минеральных удобрений, даст возможность для

производства «голубого» аммиака, который благодаря улавливанию диоксида углерода в процессе производства будет значительно снижать нагрузку на ОС. В долгосрочной перспективе, развитие получит использование водорода в качестве топлива – водородные ТЭ для автомобилей, а высокотехнологичный автономный водородный энергетический комплекс, который можно реализовать на Балаковской АЭС, будет способен производить и подавать электроэнергию в энергосистему в часы повышенной нагрузки. Авторы считают, что для Саратовской области перспективно и целесообразно развивать направление по производству водородных ТЭ на существующих мощностях АО Саратовский аккумуляторный завод и ООО «Завод автономных источников тока» с их грамотной модернизацией.

Саратовская область имеет потенциал производства низкоуглеродного водорода – биоводорода, произведённого путём переработки отходов сельского хозяйства, за счёт риформинга биогаза из биомассы органических отходов, с попутной очисткой CO₂ или методом термофильного сбраживания.

Государственные меры стимулирования производителей и потребителей водорода в регионе могут сыграть решающую роль в повышении и эффективности развития водородной энергетики в Саратовской области. Несмотря на то, что это требует дальнейших вложений в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, инфраструктуру, ввод в действие новых стандартов, подготовку специализированных кадров и др., это будет иметь большое значение для роста экономических показателей региона, даст серьёзный толчок развитию его научно-технического потенциала. Развитие водородной энергетики в Саратовской области, как участника Южного производственного кластера, также может быть успешно ориентировано на экспортный рынок – страны Ближнего Востока, которые рождают значительный спрос на водород.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Технологические вызовы и социально-экономические преобразования в контексте зелёных переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства

Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р [Электронный ресурс] <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYt4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (Дата обращения: 29.01.2024).

2. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р [Электронный ресурс] <https://www.gazprom.ru/f/posts/79/839376/soncept-hydrogen-energy.pdf> (Дата обращения: 23.01.2024).

3. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д., Глаголева А. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2019. 61 с. doi: 10.13140/RG.2.2.15540.91524

4. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 79–91. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91

5. Разманова С.В. Перспективы развития водородной энергетики в Российской Федерации // Георесурсы. 2023. Т. 25. № 3. С. 216–226. doi: 10.18599/grs.2023.3.25

6. Скугорова С.Г., Домрачева Л.И., Трефилова Л.В., Стариков П.А., Ашихмина Т.Я. Биозащита древесины от микробных повреждений (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 6–15. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-006-015

7. Singh V., Das D. Potential of hydrogen production from biomass // Science and engineering of hydrogen-based energy technologies: Hydrogen production and practical applications in energy generation / Ed. P.E.V. de Miranda. Academic Press, 2019. P. 123–164. doi: 10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4

8. Velmozhina K., Shinkevich P., Zhazhkov V., Politaeva N., Korablev V., Vladimirov I., Morales T.C. Production of biohydrogen from microalgae biomass after wastewater treatment and air purification from CO₂ // Processes. 2023. V. 11. No. 10. Article No. 2978. doi: 10.3390/pr11102978

9. Велесюк А. Водородная энергетика – тренд XXI века [Электронный ресурс] https://archive.atomicexpert.com/hydrogen_energy (Дата обращения: 23.11.2023).

10. Liu W., Wan Y., Xiong Y., Gao P. Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. No. 58. P. 24584–24591. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.193

11. Обзор российского рынка водорода. Июль 2023. Прогноз развития до 2027 года [Электронный ресурс] <https://dzen.ru/a/ZPb25bOKyjqG2EO> (Дата обращения: 03.07.2024).

12. Дегтярев К. Как работает водородный топливный элемент и почему автомобили с таким «двигателем» ещё не ездят по всему миру [Электронный ресурс] <https://e-plus.media/technologies/kak-rabotaet-vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatелем-eshche-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/>

vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatelem-eshhe-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/ (Дата обращения: 23.01.2024).

13. Паймулин В. 806 миллиардов выручки через 6 лет: что в закрытой части «плана Когогина»? [Электронный ресурс] <https://www.business-gazeta.ru/article/626662> (Дата обращения: 23.03.2024).

14. Веселов Ф., Соляник А. Экономика производства водорода с учётом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика. 2022. № 4. С. 58–67. doi: 10.46920/2409-5516_2022_4170_58

15. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Оценка эффективности получения водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2016. № 5–6. С. 59–70. doi: 10.15518/isjaee.2016.05-06.006

16. Yurin V.E., Egorov A.N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 60. P. 1068–1076. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225

17. Опарина А.М., Политаева Н.А., Ильин И.В. Глобальные перспективы перехода на зелёную энергетику в Саратовской области // Поволжский экологический журнал. 2023. № 3. С. 314–330. doi: 10.35885/1684-7318-2023-3-314-330

18. Preethi, Mohamed Usman T.M., Rajesh Banu J., Gunasekaran M., Kumar G. Biohydrogen production from industrial wastewater: An overview // Bioresour. Technol. Rep. 2019. V. 7. Article No. 100287. doi: 10.1016/j.biteb.2019.100287

19. Zhu G., Li J., Liu C., Huang X., Liu L. Simultaneous production of bio-hydrogen and methane from soybean protein processing wastewater treatment using anaerobic baffled reactor (ABR) // Desalin. Water Treat. 2013. V. 53. No. 10. P. 2675–2685. doi: 10.1080/19443994.2013.868836

20. Fedorov M., Maslikov V., Korablev V., Politaeva N., Chusov, A., Molodtsov D. Production of biohydrogen from organ-containing waste for use in fuel cells // Energies. 2022. V. 15. No. 21. Article No. 8019. doi: 10.3390/en15218019

21. Li Y.C., Liu Y.F., Chu C.Y., Chang P.L., Hsu C.W., Lin P.J., Wu S.Y. Techno-economic evaluation of biohydrogen production from wastewater and agricultural waste // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. No. 20. P. 15704–15710. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.043

22. Маевский А.П. Анализ энергетического потенциала навозных стоков животноводческих комплексов и птицефабрик // Технические системы и технологические процессы: сб. статей Международ. научно-практич. конф. Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2018. С. 116–120.

23. Посевные площади, валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в 2023 году [Электронный ресурс] https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04_Посевные%20площади_29_03_24.pdf (Дата обращения: 29.03.2024).

24. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Саратовской области в 2022 году [Электронный ресурс] https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION_ID=65&ELEMENT_ID=4622 (Дата обращения: 23.01.2024).

25. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.З., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70–83. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83

26. Завод по производству минудобрений с выходом на речную инфраструктуру планируется создать в Саратовской области [Электронный ресурс] <https://portnews.ru/news/329809/> (Дата обращения: 23.01.2024).

27. Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака [Электронный ресурс] https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf (Дата обращения: 23.01.2024).

28. Лукьянова В.О., Гоц И.Ю. Анализ влияния величины катодной поляризации на количество сорбированного водорода Al-Sm сплавом из электрохимических измерений // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 4. С. 206–213. doi: 10.18500/1608-4039-2020-20-4-206-213

29. Макарян И.А., Седов И.В. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики // Российский химический журнал. 2021. Т. 65. № 2. С. 3–21. doi: 10.6060/rcj.2021652.1

30. Виноградов Н.Е., Талакин О.Г., Каграманов Г.Г. Мембранное выделение водорода из выбросных газов // Химическая промышленность сегодня. 2013. № 5. С. 29–39.

31. ОАО «Саратовский НПЗ» ввело в эксплуатацию установку короткоциклового адсорбции водорода [Электронный ресурс] <https://limited.rosneft.ru/press/news/item/173428/> (Дата обращения: 23.01.2024).

References

1. Energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035: Order of the Government of the Russian Federation dated 06.09.2020 No. 1523-r [Internet resource] <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (Accessed: 29.01.2024) (in Russian).

2. The concept for the development of hydrogen energy in the Russian Federation: Order of the Government of the Russian Federation dated 05.08.2021 No. 2162-r [Internet resource] <https://www.gazprom.ru/f/posts/79/839376/soncept-hydrogen-energy.pdf> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).

3. Mitrova T., Melnikov Yu., Chugunov D., Glagoleva A. Hydrogen economy – the path to low-carbon development.

Moskva: Energy Center of the Moscow School of Management Skolkovo, 2019. 61 p. (in Russian). doi: 10.13140/RG.2.2.15540.91524

4. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Pechenkin A.V. Prospects for the development of hydrogen power engineering in Tatarstan // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. V. 22. No. 6. P. 79–91 (in Russian). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91

5. Razmanova S.V. Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation // Georesursy. 2023. V. 25. No. 3. P. 216–226 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2023.3.25

6. Skugoreva S.G., Domracheva L.I., Trefilova L.V., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Bioprotection of wood from microbial damage (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-006-015

7. Singh V., Das D. Potential of hydrogen production from biomass // Science and engineering of hydrogen-based energy technologies: Hydrogen production and practical applications in energy generation / Ed. P.E.V. de Miranda. Academic Press, 2019. P. 123–164. doi: 10.1016/B978-0-12-814251-6.00003-4

8. Velmozhina K., Shinkevich P., Zhazhkov V., Politaeva N., Korablev V., Vladimirov I., Morales T.C. Production of biohydrogen from microalgae biomass after wastewater treatment and air purification from CO₂ // Processes. 2023. V. 11. No. 10. Article No. 2978. doi: 10.3390/pr11102978

9. Velesyuk A. Hydrogen energy is a trend of the 21st century [Internet resource] https://archive.atomicexpert.com/hydrogen_energy (Accessed: 23.11.2023) (in Russian).

10. Liu W., Wan Y., Xiong Y., Gao P. Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. No. 58. P. 24584–24591. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.193

11. Review of the Russian hydrogen market. July 2023. Development forecast until 2027 [Internet resource] <https://dzen.ru/a/ZPb25bOKyjqG2EO> (Accessed: 03.07.2024) (in Russian).

12. Degtyarev K. How does a hydrogen fuel cell work and why cars with such an “engine” are not yet driving around the world [Internet resource] <https://e-plus.media/technologies/kak-rabotaet-vodorodnyj-toplivnyj-element-i-pochemu-avtomobili-s-takim-dvigatелеm-eshhe-ne-ezdyat-po-vsemu-miru/> (Accessed: 23.01.2024) (in Russian).

13. Paymulin V. 806 billion in revenue in 6 years: what’s in the closed part of the “Kogogin plan”? [Internet resource] <https://www.business-gazeta.ru/article/626662> (Accessed: 23.03.2024).

14. Veselov F., Solyanik A. Economics of hydrogen production, taking into account exports and the Russian

- market // Energy Policy. 2022. No. 4. P. 58–67 (in Russian). doi: 10.46920/2409-5516_2022_4170_58
15. Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production on base of the off-peak electricity of atomic power station // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). 2016. No. 5–6. P. 59–70 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2016.05-06.006
16. Yurin V.E., Egorov A.N. Multi-channel general reservation of NPP own needs on the basis of combination with autonomous hydrogen energy complex // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. V. 60. P. 1068–1076. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.225
17. Oparina A.M., Politaeva N.A., Illin I.V. Global perspectives of transition to green energy generation in the Saratov region // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2023. No. 3. P. 314–330 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-3-314-330
18. Preethi, Mohamed Usman T.M., Rajesh Banu J., Gunasekaran M., Kumar G. Biohydrogen production from industrial wastewater: An overview // Bioresour. Technol. Rep. 2019. V. 7. Article No. 100287. doi: 10.1016/j.biteb.2019.100287
19. Zhu G., Li J., Liu C., Huang X., Liu L. Simultaneous production of bio-hydrogen and methane from soybean protein processing wastewater treatment using anaerobic baffled reactor (ABR) // Desalin. Water Treat. 2013. V. 53 No. 10. P. 2675–2685. doi: 10.1080/19443994.2013.868836
20. Fedorov M., Maslikov V., Korablev V., Politaeva N., Chusov A., Molodtsov D. Production of biohydrogen from organ-containing waste for use in fuel cells // Energies. 2022. V. 15. No. 21. Article No. 8019. doi: 10.3390/en15218019
21. Li Y.C., Liu Y.F., Chu C.Y., Chang P.L., Hsu C.W., Lin P.J., Wu S.Y. Techno-economic evaluation of biohydrogen production from wastewater and agricultural waste // Int. J. Hydrogen Energy. 2012. V. 37. No. 20. P. 15704–15710. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.043
22. Mayevsky A.R. Analysis of the energy potential of manure waste from livestock complexes and poultry farms // Technical systems and technological processes: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Samara: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu “Aeterna”, 2018. P. 116–120 (in Russian).
23. Sown area, gross harvest and yield of agricultural crops in 2023 [Internet resource] https://64.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/04_Sown%20areas_29_03_24.pdf (Accessed: 29.03.2024) (in Russian).
24. Report on the state and protection of the environment of the Saratov region in 2022 [Internet resource] https://www.minforest.saratov.gov.ru/info/?SECTION_ID=65&ELEMENT_ID=4622 (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).
25. Yarullin R.S., Salikhov I.Z., Cherezov D.Z., Nurislamova A.R. Prospects for hydrogen technologies in the energy sector and the chemical industry // Power engineering: research, equipment, technology. 2021. V. 23. No. 2. P. 70–83 (in Russian). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-70-83
26. A plant for the production of mineral fertilizers with access to the river infrastructure is planned to be created in the Saratov region [Internet resource] <https://portnews.ru/news/329809/> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).
27. Atlas of Russian projects for the production of low-carbon and carbon-free hydrogen and ammonia [Internet resource] https://www.bcci.bg/resources/files/%D0%90%D0%A2%D0%9B%D0%90%D0%A1_%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%A0%D0%9E%D0%94_%D0%A0%D0%A3%D0%A1.pdf (Accessed: 23.01.2024) (in Russian).
28. Lukyanova V.O., Gots I.Yu. Analysis of the influence of the cathodic polarization value on the amount of hydrogen sorption of Al-Sm with the alloy of electrochemical measurements // Electrochemical energetics. 2020. V. 20. No. 4. P. 206–213 (in Russian). doi: 10.18500/1608-4039-2020-20-4-206-213
29. Makaryan I.A., Sedov I.V. State and prospects for development of global hydrogen power engineering // Russian Chemistry Journal. 2021. V. 65. No. 2. P. 3–21. doi: 10.6060/rcj.2021652.1
30. Vinogradov N.E., Talakin O.G., Kagramanov G.G. Membrane separation of hydrogen from exhaust gases // Khimicheskaja promyshlennost' segodnja. 2013. No. 5. P. 29–39 (in Russian).
31. JSC Saratov Oil Refinery commissioned a short-cycle hydrogen adsorption unit [Internet resource] <https://limited.rosneft.ru/press/news/item/173428/> (Accessed: 01.23.2024) (in Russian).

Preparation of heteropoly acid quaternary ammonium salt eco-friendly catalyst for diesel oil deep oxidative desulfurization

© 2024. J. Yan¹ ORCID: 0009-0005-9429-9297, Z. Wang¹ ORCID: 0000-0003-0487-2247, T. Liu¹ ORCID: 0000-0001-6036-3215, Y. Chen^{1,2} ORCID: 0009-0006-9250-3159
¹Liaoning Institute of Science and Technology, 176, Xianghuai Rd., Benxi, Liaoning, P. R. China, 117004,
²Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000, e-mail: yanjs910@163.com

Hydrodesulfurization (HDS) is the most widely used method for fuel oil desulfurization, which can easily remove mercaptan and thiophene from diesel oil, but the removal rate of dibenzothiophene (DBT) and its alkylated derivatives is low. Compared with traditional HDS technology, oxidative desulfurization (ODS) technology has the advantages of less investment, mild reaction conditions, and high ODS activity for DBT and its derivatives. Heteropoly acid (salt)/H₂O₂ system is highly efficient and the oxidation product of hydrogen peroxide is water, making them green catalysts. A new type of polyoxometalates phase transfer catalyst, [(C₁₆H₃₃(CH₃)₃)N]₃-HPW₁₁VO₄₀, was synthesized through ion exchange method. It was applied to the catalytic oxidative desulfurization of model diesel oil using H₂O₂ as oxidant. The influencing factors of reaction were investigated in detail. The catalyst exhibits the dibenzothiophene conversion rate of 100% and excellent reusability and retrievability with 99.97% conversion after five times reaction in mild reaction conditions of n(catalyst)/n(DBT)=1/80, n(H₂O₂)/n(DBT)=8/1, 50 °C, and atmospheric pressure in 3 h. The catalyst could be quickly separated and recycled by centrifugation after reaction and hence be promising in the low-sulfur fuel production.

Keywords: oxidative desulfurization, vanadium-substituted phosphotungstic acid, phase transfer catalyst, dibenzothiophene.

УДК 54.057

Получение экологичного катализатора на основе четвертичной аммониевой соли гетерополикислоты для глубокой окислительной десульфуризации дизельного топлива

© 2024. Ц. Ян¹, д. х. н., профессор, Ц. Ван¹, д. х. н., преподаватель, Т. Лю¹, д. х. н., доцент, Я. Чен^{1,2}, студент,
¹Ляонинский институт науки и технологии, 117004, Китай, провинция Ляонин, г. Бэньси, Сянхуай Роуд, д. 176,
²Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36, e-mail: yanjs910@163.com

Процесс гидродесульфуризации – наиболее широко используемый метод, позволяющий легко удалить из дизельного топлива меркаптан и тиофен, но скорость удаления дибензотиофена (ДБТ) и его алкилированных производных низка. В сравнении с вышесказанным, технология окислительной десульфурации (ОДС) имеет преимущества в виде меньших инвестиций, мягких условий реакции и высокой активности в отношении ДБТ и его производных. Система гетерополикислота (соль)/H₂O₂ высокоэффективна, а продуктом окисления пероксида водорода является вода, что делает её экологически чистым катализатором. Методом ионного обмена синтезирован новый тип катализатора фазового переноса полиоксометаллатов [(C₁₆H₃₃(CH₃)₃)N]₃-HPW₁₁VO₄₀, который был применён для каталитической окислительной десульфуризации модельного дизельного топлива с использованием пероксида водорода в качестве окислителя. Подробно исследованы факторы, влияющие на ход реакции. Катализатор демонстрирует степень конверсии дибензотиофена 100% и отличную пригодность для повторного использования и восстановления после пятикратной реакции в мягких условиях: n(катализатор)/n(ДБТ)=1/80, n(H₂O₂)/n(ДБТ)=8/1, 50 °C и атмосферном давлении в течение 3 ч. Катализатор может быть быстро отделён и утилизирован центрифугированием после реакции и перспективен для производства топлива с низким содержанием серы.

Ключевые слова: окислительная десульфурация, ванадий-замещённая фосфотунгстговая кислота, катализатор фазового переноса, дибензотиофен.

After the combustion of sulfur-containing compounds in diesel oil, sulfur oxide compounds (SO_x) formed is an important reason of acid rain and haze. So ultra-low-sulfur diesel, with sulfur content lower than 10 or 15 ppmw, is applicable in China, Europe and North America [1–3]. Hydrodesulfurization (HDS) is the most widely used method for fuel oil desulfurization, which can easily remove mercaptan and thiophene from diesel oil, but the removal rate of dibenzothiophene (DBT) and its alkylated derivatives is low. Compared with traditional HDS technology, oxidative desulfurization (ODS) technology has the advantages of less investment, mild reaction conditions, and high ODS activity for DBT and its derivatives [1, 2].

Heteropoly acid (salt) catalysts are dual-function catalysts that are both acidic and redox in nature, with unique hexagonal cage-like structures and pseudo-liquid-like behavior characteristics. The catalytic performance can be modulated by changing the central atom and coordination atom, which is beneficial for catalyst design. Heteropoly acid (salt)/ H_2O_2 system have attracted more attention of many researchers because they are highly efficient and the oxidation product of hydrogen peroxide is water, making them green catalysts [3–6]. However, the heteropoly acid / H_2O_2 system is carried out in a two-phase system, and the aqueous H_2O_2 and sulfur-containing compounds in fuel have high interphase resistance and low mass transfer rate, which affects the oxidation reaction rate and desulfurization effect. The application of quaternary ammonium salt phase transfer catalyst can help transfer the reactants from one phase to another, reduce the reaction resistance, and accelerate the reaction rate of the hetero-phase system [2, 4].

Objects and methods of research

Different heteropoly acid (salt) catalysts have different oxidative ability [7, 8]. Similarly, different quaternary ammonium salts have different phase transfer abilities [4]. Our purpose is to prepare a new type of polyoxometalate phase transfer catalyst with good amphiphilic and oxidizing properties. In this study, vanadium-substituted ternary heteropolyacid ($\text{H}_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$) was first synthesized and then reacted with different proportions of cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) by ion exchange method to obtain a series of phase transfer catalysts with different compositions. The ODS activity and reusability of catalysts, optimum catalyst composition and reaction conditions were investigated.

$\text{H}_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$ was synthesized according to the literature [5]. The phase transfer catalysts with different composition were prepared by ion exchange method. Taking $(\text{CTAB})_n\text{H}_{4-n}[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$ for example. 0.8, 0.6, 0.4 and 0.2 mmol CTAB were dissolved in 20 mL distilled water to form solution A, respectively. 0.55 g (0.2 mmol) of $\text{H}_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$ was dissolved in 30 mL distilled water to form solution B, which was added dropwise to solution A and stirred at 50 °C for 5 h, producing milky precipitate. After cooling at room temperature, it was filtered and washed with deionized water until Br was not present. The powder solids were dried at 110 °C to obtain different compositions catalysts, which were denoted as $(\text{CTAB})_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, $(\text{CTAB})_3\text{H}[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, $(\text{CTAB})_2\text{H}_2[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, $(\text{CTAB})\text{H}_3[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, respectively.

In a typical DBT oxidation experiment, 40 mL of model fuel (1.0 wt.% DBT in n-octane) was added to a three-neck flask with a magnetic stirring device, and then a certain amount of catalyst and H_2O_2 . The reaction was carried out in a constant temperature water bath at 50 °C for 1–3 h. Evaluation of catalyst activity was measured by DBT conversion. Both raw material and products were analyzed on Agilent 6890N gas chromatograph, equipped with HP-5 capillary column (30 m×0.32 mm×0.25 μm), and FID detector. Infrared spectra of catalysts were measured by Beijing Beifen-Ruili WQF-510A FT/IR spectrometer during the wavenumber range 400–4000 cm^{-1} using KBr pellet.

Results and discussion

Figure 1 shows FT-IR spectra of $\text{H}_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, CTAB, $(\text{CTAB})_3\text{H}[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$ before and after reaction. In the infrared spectra of fresh $\text{H}_4[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, there are four characteristic vibrational bands at 804, 893, 982 and 1080 cm^{-1} , which are assigned to $\nu_{\text{as}}(\text{P}-\text{O}_a)$, $\nu_{\text{as}}(\text{M}=\text{O}_d)$, $\nu_{\text{as}}(\text{M}-\text{O}_b-\text{M})$ and $\nu_{\text{as}}(\text{M}-\text{O}_c-\text{M})$ ($\text{M}=\text{W}, \text{V}$), respectively. Those four well-known characteristic bands prove the presence of Keggin-type heteropoly anion (HPA) [5]. In the infrared spectra of CTAB, the absorption peaks at 2920 cm^{-1} and 2849 cm^{-1} are attributed to the stretching vibration of $-\text{CH}_2$ and $-\text{CH}_3$, respectively, while 1475 cm^{-1} and 720 cm^{-1} are due to the deformation vibration peaks of $-\text{CH}$ [4]. Moreover the characteristic peaks of Keggin-type heteropoly acid and alkyl can be seen from the IR-spectra of $(\text{CTAB})_3\text{H}[\text{PW}_{11}\text{VO}_{40}]$, indicating that the existence of quaternary ammonium cation group and heteropoly anion groups in the obtained phase

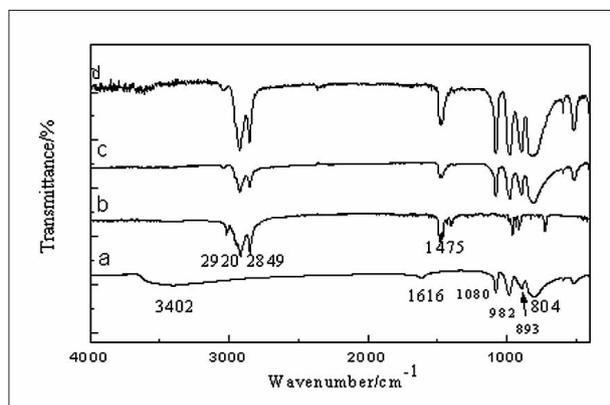


Fig. 1. FT-IR spectra of the samples: a – $H_4[PW_{11}VO_{40}]$, b – CTAB, c – fresh $(CTAB)_3H[PW_{11}VO_{40}]$, d – spent $(CTAB)_3H[PW_{11}VO_{40}]$

transfer catalyst. Compared with fresh catalyst, the IR spectra of spent catalyst remained almost unchanged after the fivefold reaction, indicating good catalyst stability.

The oxidative desulfurization performance of different catalysts were evaluated and shown in Table 1. The conversion rate of DBT in the absence of catalyst is 3.37%, indicating that the reaction rate is very slow (Table 1). The DBT conversions of $H_3PW_{12}O_{40}$ and $H_4PW_{11}VO_{40}$ catalysts were 24.38% and 36.15%, respectively. The low conversions were mainly attributed to the high mass transfer resistance in the oil-water two-phase system, which affected the reaction

rate and desulfurization efficiency. Under the same conditions, the DBT removal rates of $(CTAB)_3PW_{12}O_{40}$ and $(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$ catalysts were 2.96 times and 2.39 times higher than those of $H_3PW_{12}O_{40}$ and $H_4PW_{11}VO_{40}$ catalysts, respectively, indicating that the phase transfer catalysts reduced the mass transfer resistance of oil-water two-phase system, and the desulfurization efficiency is significantly improved.

Different composition of catalysts also affects the oxidative desulfurization activity of DBT, which is probably due to the fact that different composition leads to different mass transfer rates (Table 1). The appropriate $n(CTAB)/n(PW_{11}VO_{40})$ ratio is conducive to the formation of stable emulsion drops and full contact of reactants, reducing mass transfer resistance. $(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$ has the best catalytic performance.

Table 1 also shows the influence of different oxygen-sulfur ratio ($n(H_2O_2)/n(S)$) on DBT conversion rate. When oxygen-sulfur ratio is 2, DBT conversion rate is 82.67%. When the ratio of oxygen to sulfur was 4:1, the conversion rate of DBT increased, but not significantly. When the ratio of oxygen to sulfur is 8:1, the desulfurization rate can reach 99.96% after 3 h, which is close to the complete reaction.

The influence of catalyst dosage (calculated by molar ratio of $n(catalyst)/n(S)$) on DBT conversion is shown in Table 1. In addition to the catalyst with a molar ratio of 1/100, the other

Table 1

Comparison of catalytic efficiency for ODS of DBT on different catalysts

No.	Catalyst	T, °C	t, h	$n(catalyst)/n(s)$	$n(H_2O_2):n(S)$	DBT conversion, %
1	without catalyst	50	3	0	4 : 1	3.37
2	$H_3PW_{12}O_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	24.38
3	$H_4PW_{11}VO_{40}$	50	31	1/20	4 : 1	26.15
4	$(CTAB)_3PW_{12}O_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	72.26
5	$(CTAB)H_3PW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	62.15
6	$(CTAB)_2H_2PW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	83.22
7	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	86.41
8	$(CTAB)_4PW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	4 : 1	77.68
9	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	2 : 1	82.67
10	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/20	8 : 1	99.96
11	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/40	8 : 1	100
12	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/80	8 : 1	100
13	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	3	1/100	8 : 1	96.63
14	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	50	2	1/80	8 : 1	97.86
15	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	40	2	1/80	8 : 1	91.12
16	$(CTAB)_3HPW_{11}VO_{40}$	30	2	1/80	8 : 1	45.66

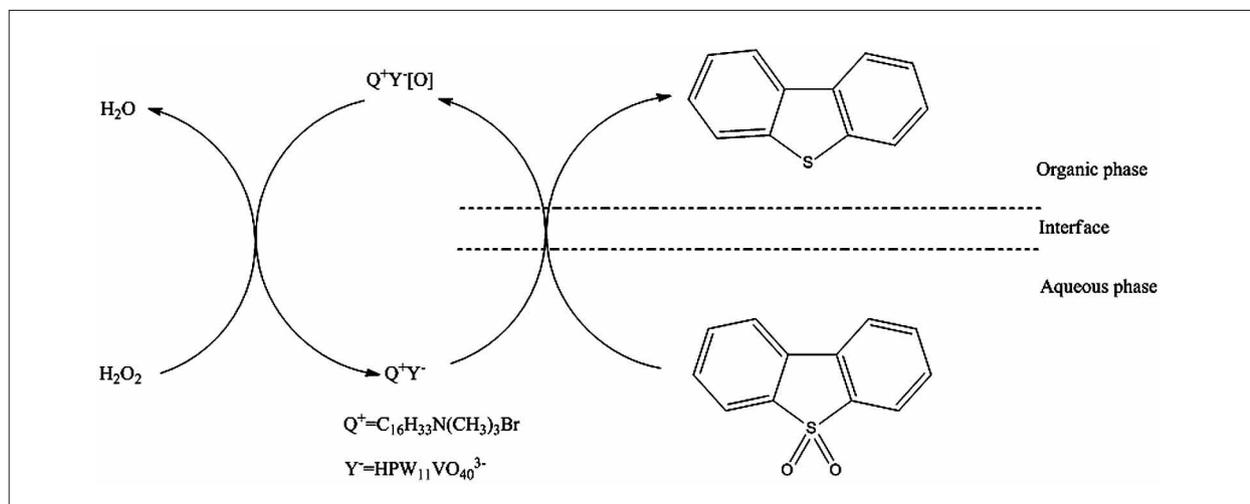


Fig. 2. ODS mechanism of DBT using $(C_{16}H_{33}N(CH_3)_3)_3HPW_{11}VO_{40}$ catalyst

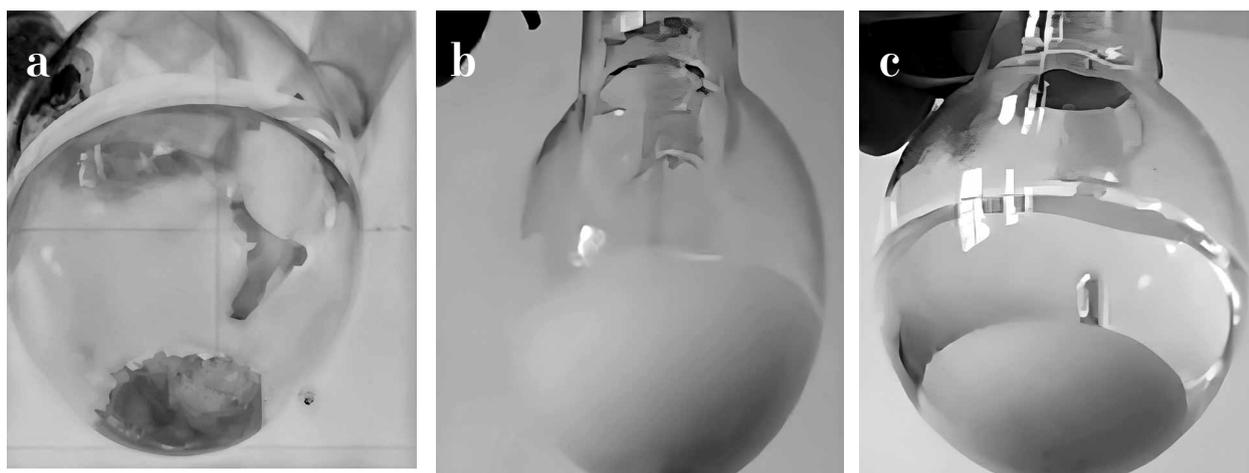


Fig. 3. Diagram of catalytic oxidative desulfurization process of DBT: a, b, c – before, during, and at the end of the reaction, respectively

catalysts can achieve more than 99% desulfurization after 3 h, so the catalyst with a molar ratio of 1/80 is selected as the best dosage.

As can be seen from Table 1, temperature is the key factor affecting the conversion rate of DBT. The conversion rate of DBT at 30 °C in 2h is 45.66%. When the reaction temperature was increased to 40 and 50 °C, the conversion rate of DBT increased significantly, reaching 91.12% and 97.86%, respectively. When the reaction time was increased from 2 to 3 h, the conversion rate of DBT reached 100%, indicating that the thermodynamic equilibrium was reached after 3 h. Therefore, 50 °C and 3 h are the best reaction temperature and reaction time from the perspective of reaction equilibrium time and DBT conversion.

The mechanism of the phase transfer catalytic oxidative desulfurization reaction can be explained by Figure 2. Heteropolyacid

anion Y^- and quaternary ammonium cation Q^+ exist in the reaction system in the form of ion pairs. Heteropolyacid anion Y^- is a hydrophilic group, which is oxidized by H_2O_2 in the aqueous phase to become an active peroxy heteropolyacid anion $Y^-[O]$. Quaternary ammonium cation Q^+ is a lipophilic group, which can bring the oxidized heteropolyacid anion $Y^-[O]$ into the oil phase. The sulfur compound DBT in the oil was catalyzed to become the more polar dibenzothiophene sulfone, and the peroxy heteropoly anion was reduced to heteropoly anion and re-entered the water phase, finishing a catalytic cycle.

It is assumed that heteropoly acid (HPA) anion provided catalytic activity, while quaternary ammonium cation provided phase transfer ability, which not only improved catalytic activity, but also facilitated the recovery of catalysts. The oxidative desulphurization process

of DBT over the phase transfer catalyst was shown from Figure 3. At the beginning of the reaction, the catalyst was solid at the bottom of the reactor and forms a heterogeneous system (Fig. 3a). When the reaction temperature was raised to 50 °C under stirring, the catalyst and reactants formed a microemulsion system and behave like homogeneous mixture during reaction (Fig. 3b). At the end of the reaction, the catalyst was cooled and settled at the bottom of the reactor (Fig. 3c). The catalyst could be quickly separated and recycled by centrifugation. It was proved that the conversion rate of DBT hardly changes after five runs, indicating that the catalyst has good reusability.

Conclusion

$[(C_{16}H_{33}(CH_3)_3N)_3HPW_{11}VO_{40}]$ with amphiphilic and oxidizing properties was synthesized through ion exchange method. It was proved to be efficient and reusable phase transfer catalyst for ODS of DBT. The catalyst exhibits DBT conversion rate of 100% and excellent reusability with 99.97% conversion after five times reaction under mild reaction conditions of $n(\text{catalyst})/n(\text{DBT})=1/80$, $n(H_2O_2)/n(\text{DBT})=8/1$, 50 °C, and atmospheric pressure in 3 h. The catalyst could be quickly separated and recycled by centrifugation after reaction and hence be promising in the low-sulfur fuel production.

The study was supported by grant from “Pharmaceutical cleaner production and industrialization innovation team of Liaoning Institute of Science and Technology”, grant number XKT202304.

References

- Ribeiro S.O., Granadeiro C.M., Almeida P.L., Pires J., Capel-Sanchez M.C., Campos-Martin J.M., Gago S., de Castro B., Balula S.S. Oxidative desulfurization strategies using Keggin-type polyoxometalate catalysts: Biphasic versus solvent-free systems // *Catal. Today*. 2019. No. 333. P. 226–236. doi: 10.1016/j.cattod.2018.10.046
- Banisharif F., Dehghani M.R., Campos-Martin J.M. Oxidative desulfurization of diesel using vanadium-substituted Dawson-type emulsion catalysts // *Energy Fuels*. 2017. V. 31. No. 5. P. 5419–5427. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02791
- Zhang Y., Gu Y., Dong X., Wu P., Li Y., Hu H., Xue G. Deep oxidative desulfurization of refractory sulfur compounds with cesium salts of mono-substituted phosphomolybdate as efficient catalyst // *Catal. Lett.* 2017. V. 147. P. 1811–1819. doi:10.1007/s10562-017-2078-5
- Huang D., Zhai Z., Lu Y.C., Yang L.M., Luo G.S. Optimization of composition of a directly combined catalyst in dibenzothiophene oxidation for deep desulfurization // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. V. 46. No. 5. P. 1447–1451. doi: 10.1021/ie0611857
- Yan J., Wang Z., E Y., He F., Zhang D., Wu Q. Catalytic synthesis of chloroacetates with thermoregulated ionic liquids based on vanadium-substituted polyoxometalate // *RSC Adv.* 2019. V. 9. P. 8404–8410. doi: 10.1039/c8ra10659b
- Julião D., Valença R., Ribeiro J.C., de Castro B., Balula S.S. Efficient eco-sustainable ionic liquid-polyoxometalate desulfurization processes for model and real diesel // *Appl. Catal. A Gen.* 2017. V. 537. P. 93–99. doi: 10.1016/j.apcata.2017.02.021.
- Wang E.B. *Guidance to Polyoxometalates*. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 156 p. (in Chinese).
- Zhang H., Dai Y., Cai L. Research progress of heteropoly acid catalyzed oxidative desulfurization // *Chemical Industry and Engineering Progress*. 2013. V. 32. No. 4. P. 809–815 (in Chinese).

Фосфатмобилизующие микроорганизмы сельскохозяйственных растений аридных экосистем Астраханской области

© 2024. А. Р. Гальперина, к. б. н., доцент,
О. Б. Сопрунова, д. б. н., профессор, А. Н. Пархоменко, к. б. н., доцент,
С. В. Еремеева, к. б. н., доцент, А. Ш. Бареева, аспирант,
Астраханский государственный технический университет,
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

Недостаток фосфора в сельскохозяйственных почвах отрицательно сказывается на продуктивности и урожайности сельскохозяйственных культур. Фосфорные удобрения широко используются для повышения урожайности во всём мире. Следовательно, существует острая необходимость в увеличении доступного для растений фосфора в почве с использованием осуществимых экологически безопасных технологий. Выделение и скрининг штаммов с повышенной фосфаторастворяющей активностью являются необходимыми этапами исследований по интенсификации фосфорного питания растений путём предпосевной инокуляции семян эффективными микроорганизмами. Из ризосферы и ризопланы сельскохозяйственных растений аридных экосистем Астраханской области выделено 50 изолятов микроорганизмов (49 бактериальных и 1 дрожжевой). Бактериальные изоляты морфологически представлены грамположительными спорообразующими (3 шт.) и неспорообразующими (43 шт.) палочками и кокками (3 шт.). Предварительный скрининг солиubilизации фосфатов изолятами на твёрдых питательных средах выявил группу из 6 изолятов, обладающих максимальной удельной фосфатмобилизацией (значения коэффициента удельной фосфатмобилизации K_f составили 2,0–6,9 ед.) и способностью понижать pH среды. Определение динамики содержания подвижных фосфатов позволило выявить изолят, способный поддерживать количество свободного фосфора в среде до 6 мкмоль/мл и понижать pH среды до уровня 4,73. Изученный изолят возможно рекомендовать в качестве основы биологического препарата по оптимизации минерального питания растений.

Ключевые слова: аридные экосистемы, микроорганизмы ризосферы и ризопланы, солиubilизация фосфатов.

Phosphate mobilizing microorganisms of agricultural plants in arid ecosystems of the Astrakhan region

© 2024. А. Р. Galperina ORCID: 0000-0002-8486-592X, О. В. Soprunova ORCID: 0000-0002-5710-6362,
А. Н. Parkhomenko ORCID: 0000-0002-0395-792X, С. В. Eremeeva ORCID: 0000-0001-5112-9101,
А. Ш. Bareeva ORCID: 0009-0006-3838-0602
Astrakhan State Technical University,
16, Tatishcheva St., Astrakhan, Russia, 414056,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

Crop productivity and yield are negatively affected by the deficiency of phosphorus in agricultural soil. Phosphate fertilizers are widely used to improve crop yields globally. Therefore, there is an urgent need to increase plant-available phosphorus in soil using feasible environmentally friendly technologies. Isolation and screening of strains with increased phosphate-solubilizing activity are necessary stages of research to intensify the phosphorus nutrition of plants by pre-sowing inoculation of seeds with effective microorganisms. 50 isolates of microorganisms (49 bacterial and 1 yeast) were isolated from the rhizosphere and rhizoplane of agricultural plants in arid ecosystems of the Astrakhan region. Bacterial isolates are morphologically represented by Gram-positive spore-forming (3 pcs.) and non-spore-forming (43 pcs.) rod-like bacteria and cocci (3 pcs.). Preliminary screening of phosphate solubilization by isolates on solid nutrient media revealed a group of 6 isolates with maximum specific phosphate mobilization (the specific phosphate mobilization coefficient – K_f – value was 2.0–6.9 units) and the ability to reduce the pH of the medium. Determination of the dynamics of mobile phosphate content allowed us to identify an isolate capable of maintaining the mobile phosphorus amount at up to 6 $\mu\text{mol/ml}$ and lowering in pH up to 4.73 in the medium. The studied isolate should be recommended as the basis of a biological preparation for optimizing the mineral nutrition of plants.

Keywords: arid ecosystems, rhizosphere and rhizoplane microorganisms, phosphate solubilization.

Аридная зона – природная зона, характеризующаяся особенностью климата, приводящей к недостатку влаги для жизни организмов. Ведение сельскохозяйственной деятельности в подобных условиях требует регулярного привлечения значительных ресурсов. При этом постоянное расширение объёма обрабатываемых площадей приводит к значительным антропогенным нагрузкам и деградации сельскохозяйственных земель [1]. Именно земли сельскохозяйственного назначения нуждаются в грамотном использовании и восстановлении почвенного плодородия как основ устойчивого развития и продовольственной безопасности страны [2, 3]. Для аридных почв существует проблема доступности фосфора для сельскохозяйственных растений. Низкая доступность фосфора для растений обусловлена способностью оксидов кальция, железа, алюминия и других элементов, имеющихся в почвах, связывать и удерживать ионы фосфатов, которые обладают природной высокой реакционной способностью [5]. В увеличении доступности соединений фосфора ведущая роль принадлежит почвенным микроорганизмам. Использование бактерий, способных переводить фосфор в доступную для растений форму, считается одним из перспективных и экологически приемлемых путей повышения эффективности мобилизации фосфора почвы [5].

Внедрение микробных технологий, созданных на основе ризобактерий, стимулирующих рост растений, помогает решить проблемы, связанные с получением экологически чистой сельскохозяйственной продукции, а также существенно повысить плодородие почвы и степень реализации генетического потенциала культурных растений [6]. Создание микробных препаратов и технологий на их основе требует создания и поддержания банка микроорганизмов, обладающих биотехнологически значимыми свойствами. Особое значение имеют аборигенные микроорганизмы, так как эффективность их деятельности в тех же экологических нишах, из которых они выделены, наиболее высока.

В почвах любого типа в процессе сожительства растений и ризосферной микробиоты формируется холобионт, представляющий собой единство хозяина и всех его симбионтов. При этом численность микробного компонента холобионта может достигать до 10 тыс. видов и до 10^{11} КОЕ/г [7]. Положительное влияние ризобактерий на растения связывают с их способностью адгезироваться на корнях, про-

являть антагонистическую активность к фитопатогенам, способствовать улучшению минерального питания и синтезировать гормоны роста растений [8–12]. Микроорганизмы ризосферы и ризопланы, перестраивая структуру своего сообщества под воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды, прямо или косвенно способствуют росту растений в стрессовых условиях [13–15]. Таким образом, выделение и изучение микроорганизмов, ассоциированных с растениями аридных экосистем, позволит в полной мере оценить их потенциал в качестве основы для разработки эффективных агробиотехнологий.

Целью работы являлось выделение фосфатмобилизирующих микроорганизмов из ризосферы и ризопланы культурных растений Астраханской области и предварительный скрининг их биотехнологически значимых свойств.

Объекты и методы исследования

Выделение микроорганизмов проводили из ризосферы и ризопланы различных культурных растений (мяты перечной – *Mentha piperita*, малины садовой – *Rubus idaeus*, смородины чёрной – *Ribes nigrum*, подсолнечника однолетнего – *Helianthus annuus*, чеснока посевного – *Allium sativum*, подсолнечника клубненосного – *Helianthus tuberosus*) методом накопительных культур [16]. Отобранные образцы корневой системы дважды отмывали стерильной дистиллированной водой для удаления частиц почвы, погружали в стерильный 0,9 % раствор хлорида натрия и встряхивали [16]. Для получения накопительной культуры 5 мл смыва с ризосферы вносили в 100 мл жидкой среды Герретсена в модификации Муромцева [17]: (г/л): глюкоза – 10,0; аспарагин – 1,0; K_2SO_4 – 0,2; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2; кукурузный экстракт – 0,02; водопроводная вода до 1 л; фосфат кальция вносили в питательную среду методом осаждения: в среду до стерилизации вносили 3,3 г/л ($Ca_2Cl_2 \cdot 6H_2O$), после его растворения добавляли 3,8 г/л $Na_3PO_4 \cdot 2H_2O$. Культивирование осуществляли на шейкере-инкубаторе при 28 °С в течение 5 сут.

Для выделения из накопительных культур колоний микроорганизмов, способных растворять трикальцийфосфат, проводили высев десятикратных разведений накопительной культуры на плотные питательные среды: 1) Муромцева [18] (г/л): глюкоза – 10,0; аспарагин – 1,0; K_2SO_4 – 0,2; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,4; дрожжевой автолизат – 0,5; агар – 17,0; вода дистиллированная – до 1,0 л с добавлением

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ непосредственно перед использованием и 2) NBRIP (National Botanical Research Institute's Phosphate growth medium) [19] (г/л): глюкоза – 10,0; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – 5,0; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 5,0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,25; KCl – 2,0; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,1; агар – 15,0, pH среды 6,8–7,0. Для получения трикальцийфосфата в плотной среде после расплавления агара вносили 5,3 г/л ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), после его растворения добавляли 5,7 г/л $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Для подтверждения изменения реакции среды в кислую сторону в состав питательной среды NBRIP вводили индикатор бромфеноловый синий (BPB) в количестве 0,01; 0,025 и 0,05 г/л. Исходный цвет питательной среды варьировал от светло-сиреневого до тёмно-фиолетового в зависимости от количества индикатора. В случае изменения реакции среды в кислую сторону под действием микробных метаболитов происходило обесцвечивание питательной среды [20].

Посевы инкубировали при 28 °С в течение 72–120 ч. При растворении трикальцийфосфата в составе среды микроорганизмами происходило образование зон просветления («зон гало») на мутной изначально среде.

Способность выделенных изолятов к мобилизации неорганических фосфатов проверяли на модифицированной среде Муромцева с внесённым индикатором бромфеноловым синим (0,025 г/л), в которую вносили 2 г/л ортофосфата кальция и «фосфоритной муки» ($3\text{Ca}_3\text{PO}_4 \cdot \text{CaCO}_3$; $33\text{Ca}_3\text{PO}_4 \cdot 7\text{CaF}$). Изоляты изучаемых бактерий засеивали уколом на поверхность твёрдой среды Муромцева, посевы инкубировали 5 сут при температуре 28 °С. По диаметру зон просветления вокруг колоний судили о способности изучаемых изолятов мобилизовать неорганические соединения фосфора, по изменению цвета среды со светло-сиреневого на светло-жёлтый судили о смещении pH в кислую сторону [21].

Коэффициент удельной фосфатрастворяющей активности изолятов (K_r = радиус зоны растворения $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ / радиус колонии) рассчитывали по [22].

Концентрацию подвижных фосфатов в процессе культивирования изолятов на жидкой среде NBRIP определяли в течение 4 сут культивирования с интервалом в 12 ч. Стерильную питательную среду использовали в качестве отрицательного контроля [4].

Определение содержания подвижных фосфатов с образованием фосфорномолибденовокислого аммония осуществляли по методу Грайнера. В опытные пробирки вносили по 1 мл культуральной жидкости исследуемого

изолята, выращенного на жидкой среде NBRIP. В качестве контроля использовали стерильную питательную среду NBRIP. Далее в пробирки вносили по 7,5 мл свежеприготовленного реагента ААМ (10 мМ гептамолибдат аммония, раствор 5Н H_2SO_4 и ацетон в соотношении 1:1:2). Затем в пробирки добавляли по 0,5 мл 1М лимонной кислоты. Пробирки центрифугировали в течение 5 мин при 8000 об./мин.

Оптическую плотность проб измеряли на спектрофотометре (ПромЭкоЛаб ПЭ-5300В, Россия) в сравнении с плотностью дистиллированной воды при $\lambda=450$ нм. Для определения концентрации подвижных фосфатов строили градуировочный график. Из основного стандартного раствора K_3PO_4 , молярная концентрация фосфатов в котором составляет 5 мкмоль/мл, готовили серию разведений [4].

Статистическую обработку полученных данных проводили стандартными статистическими методами [23] с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Из ризосферы и ризопланы культурных растений выделено 50 изолятов (49 бактериальных и 1 дрожжевой), из них 27 изолятов на среде NBRIP с добавлением бромфенолового синего и 23 изолята на среде Муромцева. Исследуемые бактериальные изоляты были представлены грамположительными споро- (6%) и неспорообразующими (88%) палочками и кокками (6%) (рис. 1).

Установлено, что все выделенные изоляты развиваются в диапазонах температур 25–37 °С и pH среды 6,0–8,5.

На следующем этапе проводили качественную оценку способности изолятов к мобилизации фосфата из различных нерастворимых соединений и понижению pH среды. Согласно литературным данным [22] наиболее корректно судить о фосфатмобилизующей активности микроорганизмов по результатам опытов на плотных питательных средах, основываясь не на значении радиуса «зоны гало» (зоны растворения), а по его соотношению к радиусу колонии [22]. Это соотношение является коэффициентом (K_r), отображающим удельную фосфатмобилизующую активность штамма на агаризованных средах. Численные значения коэффициента K_r соответствуют низкой (до 0,49), средней (0,5–1,49) и высокой (1,5 и больше) фосфатрастворяющей способности [24].

В ходе экспериментальных исследований установлено, что 28 из 50 выделенных изоля-

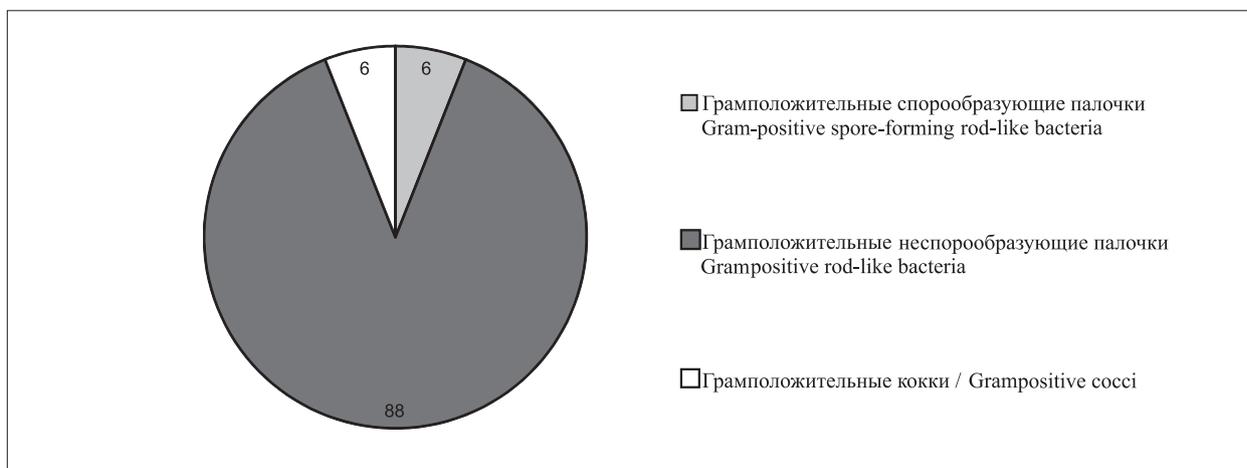


Рис. 1. Морфологические формы выделенных изолятов
Fig. 1. Morphological forms of isolated microorganisms

Таблица / Table

Фосфатмобилизующая активность выделенных изолятов / Phosphate-mobilizing activity of isolates

Изолят Isolate	Радиус зоны, мм Zone radius, mm	Радиус колонии, мм Colony radius, mm	K_r (коэффициент удельной фосфатрастворяющей активности) K_r (coefficient of specific phosphate dissolving activity)	Снижение pH среды / Lowering in pH of the medium
Изоляты солюбилизирующие фосфаты (III группа) / Solubilizing phosphate isolates (III group)				
2 (III/1)	4,6±0,6	1,7±0,1	2,70±0,35	+
10 (III/2)	3,8±0,4	1,9±0,2	2,00±0,02	+
14 (III/3)	5,9±0,6	2,6±0,5	2,30±0,13	+
22 (III/4)	3,4±0,8	2,0±0,1	1,70±0,02	+
30 (III/5)	12,5±0,4	1,8±0,2	6,90±0,39	+
38 (III/6)	5,0±0,6	2,4±0,2	2,10±0,04	+
Изоляты слабосолюбилизирующие фосфаты (II группа) / Weakly solubilizing phosphate isolates (II group)				
4	0,5±0,1	1,5±0,2	0,30±0,03	+
6	0,5±0,1	2,2±0,4	0,20±0,02	+
9	1,0±0,1	1,8±0,2	0,55±0,05	-
11	1,5±0,2	2,8±0,2	0,53±0,05	-
13	0,5±0,1	2,1±0,5	0,24±0,02	+
17	1,0±0,1	1,7±0,4	0,58±0,06	-
18	0,5±0,1	2,1±0,3	0,24±0,02	+
20	1,0±0,2	1,5±0,1	0,67±0,06	-
21	0,5±0,1	1,7±0,2	0,29±0,03	+
23	1,2±0,3	2,0±0,2	0,60±0,05	-
24	1,0±0,2	2,3±0,1	0,43±0,04	-
28	1,0±0,2	2,7±0,4	0,37±0,03	+
29	1,5±0,2	2,3±0,1	0,65±0,06	-
34	0,5±0,1	1,7±0,1	0,29±0,02	+
36	1,0±0,2	1,2±0,1	0,76±0,07	-
39	1,0±0,1	2,8±0,2	0,36±0,03	-
40	1,0±0,1	3,0±0,2	0,33±0,03	+
44	0,5±0,1	1,2±0,1	0,42±0,04	+
45	0,5±0,2	1,5±0,2	0,33±0,03	-
47	0,8±0,2	1,9±0,1	0,42±0,06	+
49	1,5±0,3	1,5±0,1	1,10±0,01	-
50	2,0±0,2	2,1±0,3	0,85±0,04	-

Примечание: «+» – pH среды снижается; «-» – pH среды не снижается. / Note: “+” – lowering in pH of the medium; “-” – no lowering in pH.

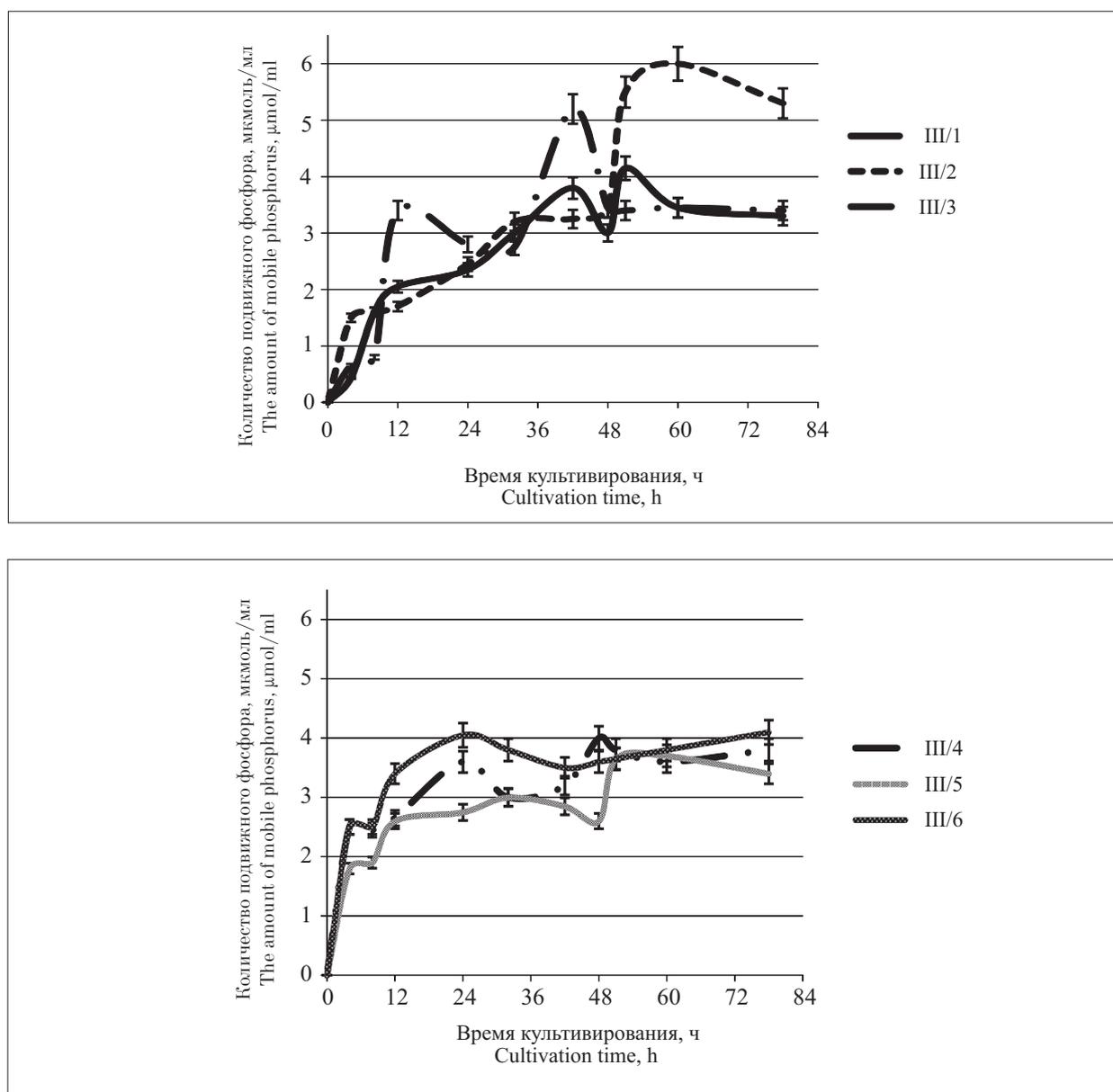


Рис. 2. Динамика количества подвижного фосфора (мкмоль/мл) в процессе роста изолятов
Fig. 2. Dynamics of mobile phosphorus ($\mu\text{mol/mL}$) during the isolates' growth

тов образуют «зоны гало» на среде Муромцева, содержащей фосфат кальция в качестве единственного источника фосфора. Способностью к понижению pH в процессе роста и развития обладали 16 изолятов из 50 (табл.).

Таким образом, на основании первичного скрининга способности к солибилизации фосфатов выделенные изоляты распределили на 3 группы: I группа (22 изолята) – несольбилизующие фосфаты (не образуют «зон гало», не подкисляют среду); II группа (22 изолята) – слабосольбилизующие фосфаты (не образуют существенных «зон гало», подкисляют среду или образуют существенные «зоны гало», не подкисляют среду); III группа (6 изолятов) – сольбилизующие фосфаты

(образуют «зоны гало», подкисляют среду). Последующие исследования по определению динамики содержания подвижных фосфатов по методу Грайнера осуществляли с изолятами, относящимися к III группе.

В результате экспериментальных исследований отмечено, что исследуемые изоляты способны к активной мобилизации фосфора из фосфата кальция (рис. 2).

Максимальную активность наблюдали у изолята III/2 – количество подвижного фосфора в среде к 60 ч составило 6 мкмоль/мл, что сопоставимо с результатами штаммов, применяемых в качестве основы биопрепаратов для оптимизации минерального питания растений [24].

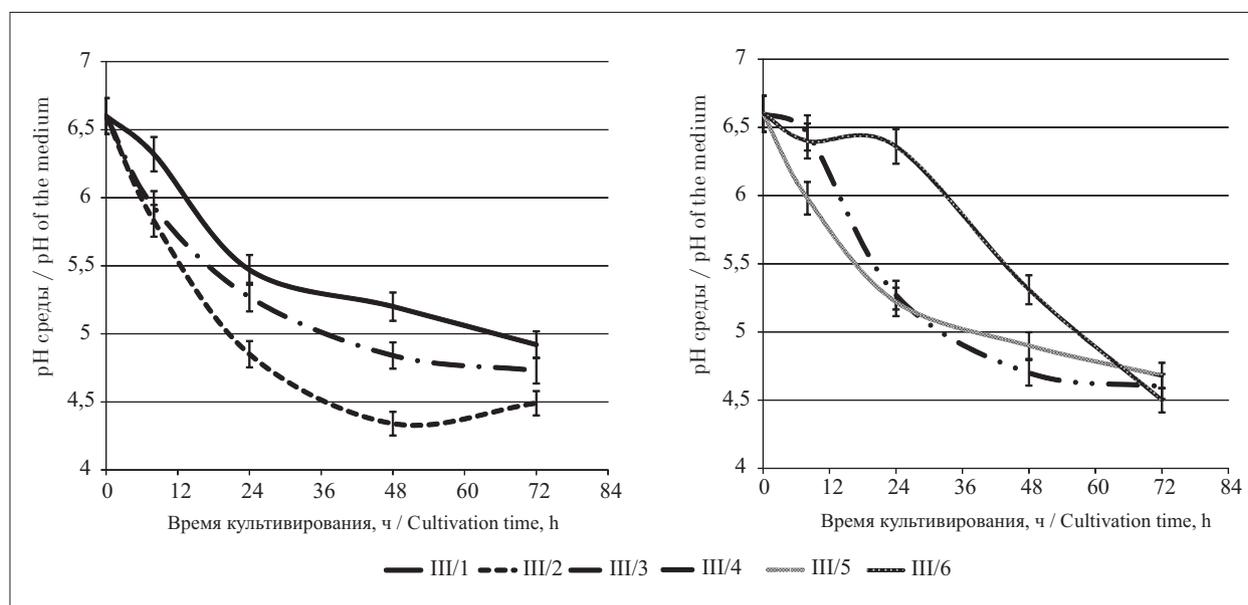


Рис. 3. Изменение рН среды в процессе роста изолятов
Fig. 3. pH changing during the isolates' growth

Растворение фосфатов может происходить за счёт синтезируемых микроорганизмами органических и неорганических кислот и хелатирующих веществ [25]. Для оценки способности выделенных изолятов выделять кислоты определяли изменение рН среды во время эксперимента (рис. 3).

В результате исследований установлено, что показатели рН снижаются во время культивирования изолятов на среде NBRIP с 6,6 до 4,5, что доказывает образование метаболитов кислотного характера.

Отобранные изоляты способны поддерживать определённую концентрацию фосфатов в растворе, обеспечивая тем самым их дальнейшее поглощение растениями. Такой тип культур является перспективным для создания биологических удобрений.

Заключение

В условиях лабораторного эксперимента предложен метод выделения и первичного скрининга фосфатмобилизирующих микроорганизмов из ризосферы и ризопланы культурных растений (мяты перечной, малины садовой, смородины чёрной, подсолнечника однолетнего, чеснока посевого, подсолнечника клубненосного). Выделено 49 бактериальных и 1 дрожжевой изолят. На основании оценки удельной фосфатмобилизующей активности все изоляты распределены на 3 группы: I группа (22 изолята) – несолубилизирующие фосфаты; II группа (22 изолята) – слабосолубилизирующие фосфаты;

III группа (6 изолятов) – солубилизирующие фосфаты. Установлено, что изоляты III группы способствуют накоплению подвижного фосфора в культивационной среде от 3,5 до 6 мкмоль/мл в течение 60 часов, понижая рН среды до 4,73. Подобные изоляты являются перспективными для создания биологических препаратов по оптимизации минерального питания растений. Предметом дальнейшего исследования явится оценка филогенетической принадлежности изолятов и поиск функциональных генов, ответственных за фосфатсолубилизирующую активность микроорганизмов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-26-00227 «Генетическая паспортизация ризосферных микроорганизмов аридных экосистем с биотехнологически значимыми свойствами».

Литература

1. Кирюшин В.И., Бельков Г.И. Научные основы адаптивно-ландшафтных систем // Система устойчивого ведения сельского хозяйства Оренбургской области. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1999. С. 10–19.
2. Каверин А.В., Кирюшин А.В., Массеров Д.А. Экологизация сельскохозяйственной науки и производства – сельскохозяйственная экология – сельскохозяйственная экология (в свете научного наследия Н.Ф. Реймерса) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 102–106. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-102-106
3. Гулянов Ю.А., Чибилёв А.А. Экологизация степных агротехнологий в условиях природных и

- антропогенных изменений окружающей среды // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 5–11. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-005-011
4. Сулейманова А.Д., Иткина Д.Л., Шарипова М.Р. Штамм бактерий *Pantoea brenneri*, обладающий фосфатмобилизующей и фунгицидной активностью // Патент RU 2654595 С1. Заявление 2017130448, 28.08.2017. Дата публикации: 21.05.2018. Бюлл. 15.
5. Кузьмина Л.Ю., Высоцкая Л.Б., Галимзянова Н.Ф., Гильванова Е.А., Рябова А.С., Мелентьев А.И. Новые штаммы фосфатмобилизирующих бактерий, продуцирующих ауксин, перспективные для сельскохозяйственной биотехнологии // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 40–46.
6. Агроэкологическая роль азотфиксирующих микроорганизмов в аллелопатии высших растений / Под ред. В.Ф. Патыки. Киев: Основа, 2004. 318 с.
7. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л., Коротких А.И., Стариков П.А., Ашихмина Т.Я. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14–25. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025
8. Моргун В.В., Коць С.Я., Кириченко Е.В. Ростостимулирующие ризобактерии и их практическое применение // Физиология и биохимия культурных растений. 2009. Т. 41. № 3. С. 187–207.
9. Дмитричева Д.С., Яппаров А.Х., Дегтярева И.А. Ризосферные аборигенные микроорганизмы, способствующие росту и развитию растений // Ученые записки КГАВМ. 2011. Т. 207. № 3. С. 186–189.
10. Кудоярова Г.Р., Курдиш И.К., Мелентьев А.И. Образование фитогормонов почвенными ризосферными бактериями как фактор стимуляции роста растений // Известия Уфимского научного центра РАН. 2011. № 3–4. С. 5–15.
11. Luo S., Xu T., Chen L., Chen J., Rao C., Xiao X., Wan Y., Zeng G., Long F., Liu C., Liu Y. Endophyte-assisted promotion of biomass production and metal-uptake of energy crop sweet sorghum by plant-growth-promoting endophyte *Bacillus* sp. SLS18 // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 93. No. 4. P. 1745–1753. doi: 10.1007/s00253-011-3483-0
12. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // SpringerPlus. 2013. No. 2. Article No. 587. doi: 10.1186/2193-1801-2-587
13. Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture // Front. Plant Sci. 2018. V. 9. Article No. 1473. doi: 10.3389/fpls.2018.01473
14. Osborne P., Hall L.J., Kronfeld-Schor N., Thybert D., Haerty W. A rather dry subject; investigating the study of arid-associated microbial communities // Environmental Microbiome. 2020. V. 15. Article No. 20. doi: 10.1186/s40793-020-00367-6
15. Ayangbenro A.S., Babalola O.O. Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria // Curr. Plant Biol. 2021. V. 25. Article No. 100173. doi: 10.1016/j.cspb.2020.100173
16. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2005. 256 с.
17. Методические указания по выделению микроорганизмов, растворяющих труднодоступные минеральные и органические соединения фосфора // Сост. В. Ф. Павлова, Т. С. Самойлова. Л., 1981. 20 с.
18. Муромцев Г.С., Маршунова Г.Н., Павлова В.Ф., Зольникова Н.В. Роль почвенных микроорганизмов в фосфорном питании растений // Успехи микробиологии. 1985. Т. 20. С. 174–198.
19. Nautiyal C.S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms // FEMS Microbiol. Lett. 1999. V. 170. No. 1. P. 265–270. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x
20. Пуронен С.В., Жусупова А.М., Тен О.А. Выделение активных культур фосфатмобилизующих микроорганизмов из ризосферы // Биотехнология. Теория и практика. 2012. № 3. С. 77–82.
21. Чеботарь В.К., Щербаков А.В., Щербакова Е.Н., Масленникова С.Н., Заплаткин А.Н., Мальфанова Н.В. Эндофитные бактерии как перспективный биотехнологический ресурс и их разнообразие // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 5. С. 648–654. doi: 10.15389/agrobiol.2015.5.648rus
22. Малиновская И.М. Определение фосфатрастворяющей активности микроорганизмов на жидкой и агаризованной средах // Агроэкологичний журнал. 2002. № 3. С. 68–71.
23. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.
24. Баранская М.И., Чайковская Л.А. Первичная оценка нововыделенных штаммов фосфатмобилизующих бактерий // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1 (25). С. 28–37. doi: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-28-37
25. Alori E.T., Glick B.R., Babalola O.O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture // Front. Microbiol. 2017. V. 8. Article No. 971. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971

References

1. Kiryushin V.I., Belkov G.I. Scientific basys of adaptive-landscape systems // The system of sustainable agriculture in the Orenburg region. Orenburg: Orenburgskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1999. P. 10–19 (in Russian).
2. Kaverin A.V., Kiryushin A.V., Masserov D.A. Ecologization of agricultural science and production –

agricultural ecology – agricultural ecology (in the light of the scientific heritage of N.F. Reymers) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 102–106 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-102-106

3. Gulyanov Yu.A., Chibilev A.A. Ecologization of steppe agrotechnologies in the conditions of natural and anthropogenic environmental changes // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 5–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-005-011

4. Suleymanova A.D., Itkina D.L., Sharipova M.R. *Pantoea brenneri* bacterial strain with phosphate mobilizing and fungicidal activity // Patent RU 2654595 C1. Application: 2017130448, 28.08.2017. Date of publication: 21.05.2018. Bull. 15 (in Russian).

5. Kuzmina L.Yu., Vysotskaya L.B., Galimzyanova N.F., Gilvanova E.A., Ryabova A.S., Melentyev A.I. New strains of phosphate mobilizing auxin producing bacteria as promising microorganisms for agricultural biotechnology // Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre. 2015. No. 1. P. 40–46 (in Russian).

6. Agroecological role of nitrogen-fixing microorganisms in the allelopathy of higher plants / Ed. V.F. Patyka. Kiev: Osnova, 2004. 320 p. (in Russian).

7. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L., Korotkikh A.I., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Specificity of plant-microbial complexes under antropogenic soil pollution (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 14–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025

8. Morgun V.V., Kots S.Ya., Kyrychenko O.V. Growth promoting Rhizobacteria and their use on practice // Fiziologiya i biokhimiya kulturnykh rasteniy. 2009. V. 41. No. 3. P. 187–207 (in Russian).

9. Dmitricheva D.S., Yapparov A.H., Degtereva I.A. Rhizosphere native microorganisms promoting growth and development of plants // Scientific notes of the Kazan State Academy of Veterinary Medicine. 2011. V. 207. No. 3. P. 186–189 (in Russian).

10. Kudoyarova G.R., Kurdish I.K., Melentyev A.I. Production of phytohormones by soil and rhizosphere bacteria as a factor of plant growth stimulation // Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre. 2011. No. 3–4. P. 5–15 (in Russian).

11. Luo S., Xu T., Chen L., Chen J., Rao C., Xiao X., Wan Y., Zeng G., Long F., Liu C., Liu Y. Endophyte-assisted promotion of biomass production and metal-uptake of energy crop sweet sorghum by plant-growth-promoting endophyte *Bacillus* sp. SLS18 // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 93. P. 1745–1753. doi: 10.1007/s00253-011-3483-0

12. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils // SpringerPlus. 2013. No. 2. Article No. 587. doi: 10.1186/2193-1801-2-587

13. Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture // Front. Plant Sci. 2018. V. 9. Article No. 1473. doi: 10.3389/fpls.2018.01473

14. Osborne P., Hall L.J., Kronfeld-Schor N., Thybert D., Haerty W. A rather dry subject; investigating the study of arid-associated microbial communities // Environmental Microbiome. 2020. V. 15. Article No. 20. doi: 10.1186/s40793-020-00367-6

15. Ayangbenro A.S., Babalola O.O. Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria // Curr. Plant Biol. 2021. V. 25. Article No. 100173. doi: 10.1016/j.cpb.2020.100173

16. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Workshop on microbiology. Moskva: Drofa, 2005. 256 p. (in Russian).

17. Methodological guidelines for the isolation of microorganisms that dissolve difficult-to-reach mineral and organic phosphorus compounds / Eds. V.F. Pavlova, T.S. Samoylova. Leningrad, 1981. 20 p. (in Russian).

18. Muromtsev G.S., Marshunova G.N., Pavlova V.F., Zolnikova N.V. Role of soil microorganisms in phosphorus nutrition of plants // Uspekhi mikrobiologii. 1985. V. 20. P. 174–198 (in Russian).

19. Nautiyal C.S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms // FEMS Microbiol. Lett. 1999. V. 170. No. 1. P. 265–270. doi: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x

20. Puronen S.V., Zhusupova A.M., Ten O.A. Isolation of active cultures of phosphate-mobilizing microorganisms from the rhizosphere // Biotechnology. Theory and practice. 2012. No. 3. P. 77–82 (in Russian).

21. Chebotar V.K., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N., Maslennikova S.N., Zaplatkin A.N., Mal'fanova N.V. Biodiversity of endophytic bacteris as a promising biotechnological resource // Agricultural Biology. 2015. V. 50. No. 5. P. 648–654 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiol.2015.5.648rus

22. Malinovskaya I.M. Determination of phosphate-dissolving activity of microorganisms on liquid and agarised media // Agroecological Journal. 2002. No. 3. P. 68–71 (in Russian).

23. Lakin G.F. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).

24. Baranskaya M.I., Chaikovskaya L.A. Primary evaluation of newly isolated strains of phosphate-mobilizing bacteria // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 1 (25). P. 28–37 (in Russian). doi: 10.33952/2542-0720-2021-1-25-28-37

25. Alori E.T., Glick B.R., Babalola O.O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture // Front. Microbiol. 2017. V. 8. Article No. 971. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971

Специфика фототрофных наземных микробных комплексов в посевах пшеницы

© 2024. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор,
П. А. Стариков³, аспирант,

Л. И. Домрачева^{1,3}, д. б. н., профессор,

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,

³Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133

email: dli-alga@mail.ru

В статье представлены результаты определения видового и количественного состава водорослей и цианобактерий в наземных разрастаниях в посевах пшеницы, семена которой перед посевом были инокулированы различными микроорганизмами в монокультурах, бинарных и тройных сочетаниях. Видовой состав альгоцианофлоры «цветущей» почвы был представлен 24 видами, в том числе: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5. Инокулянтами были представители прокариотных и эукариотных микроорганизмов – антагонисты *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp. и фитопатоген *Fusarium culmorum*. В одном из вариантов опыта использовали предпосевную обработку фунгицидом «Максим»®. Показано, что при формировании «цветения» почвы доминантами микробиома являются зелёные водоросли (*Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*) и цианобактерии (виды родов *Leptolyngbya*, *Phormidium*). При определении численности фототрофных популяций установлено, что их плотность колеблется от 1,8 до 8,1 млн кл./см². При этом максимум развития фототрофов обнаружен в контрольном варианте, а минимальная численность – в варианте с химическим протравителем. В вариантах с микробной инокуляцией пик развития микрофототрофов характерен для случаев с обработкой тройной смесью и бинарной смесью *Fischerella* + *Trichoderma*. Определение структуры микробных популяций показало, что на искусственном инфекционном фоне выявлено сильнейшее доминирование цианобактерий (80,2%), обусловленное предпосевной инокуляцией семян пшеницы фитопатогеном *F. culmorum*. Относительно высокое содержание цианобактерий (до 60%) наблюдается в 4-х вариантах эксперимента (*Fischerella*, *Fischerella* + *Trichoderma*, *Trichoderma* + *Fusarium*, *Fischerella* + *Fusarium*) и в оставшихся 4-х вариантах отмечается некоторое доминирование микроскопических водорослей в пределах от 52 до 58%. Следовательно, по результатам исследований, в отличие от химического фунгицида, существенно подавляющего развитие водорослей и цианобактерий, микробная инокуляция не приводит к радикальным сдвигам в состоянии наземных фототрофных микробных сообществ.

Ключевые слова: «цветение» почвы, биопрепараты, цианобактерии, водоросли, видовой состав, численность микрофототрофов.

Specificity of phototrophic terrestrial microbial complexes under wheat crops

© 2024. L. V. Kondakova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-2190-686X³

P. A. Starikov³, ORCID: 0000-0002-3205-6696³

L. I. Domracheva^{1,3}, ORCID: 0000-0002-7104-3337³

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,

³Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: dli-alga@mail.ru

The article presents the results of determining the species and quantitative composition of algae and cyanobacteria in terrestrial growths under wheat crops. The wheat seeds were inoculated with various microorganisms in mono-, binary and triple combinations before sowing. Algocyanoflora of the “blooming” soil was represented by 24 species: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5. The inoculants were representatives of prokaryotic and eukaryotic microorganisms – antagonists of *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp. and the phytopathogen *Fusarium culmorum*. In one of the experimental variants, pre-sowing treatment with the fungicide “Maksim”® was used. It has been shown that during the formation of soil “blooming” the dominant microbiomes are green algae (*Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*) and cyanobacteria (species of the genera *Leptolyngbya*, *Phormidium*). When determining the number of phototrophic populations, it was found that their density ranges from 1.8 to 8.1 million cells/cm². At the same time, the maximum development of phototrophs was found in the control variant, and the minimum number was found in the variant with a chemical disinfectant. In variants with microbial inoculation, the peak development of microphototrophs is typical for treatment with a triple mixture and a binary mixture of *Fischerella* + *Trichoderma*. Determination of the structure of microbial populations showed that the strongest dominance of cyanobacteria (80,2%) was detected on an artificial infectious background caused by pre-sowing inoculation of wheat seeds with the phytopathogen *F. culmorum*. A relatively high content of cyanobacteria (up to 60%) is observed in 4 experimental variants (*Fischerella*, *Fischerella* + *Trichoderma*, *Trichoderma* + *Fusarium*, *Fischerella* + *Fusarium*) and in the remaining 4 variants there is some dominance of microscopic algae ranging from 52 to 58%. Therefore, according to the results obtained, microbial inoculation does not lead to radical changes in the state of terrestrial phototrophic microbial communities, while chemical fungicide significantly suppresses the development of algae and cyanobacteria.

Keywords: soil “blooming”, biological products, cyanobacteria, algae, species composition, number of microphototrophs.

Массовое развитие водорослей и цианобактерий на поверхности изнутрипочвенного пула фототрофов получило название «цветение» почвы. Этот феномен характерен для пахотных, целинных и городских почв. Как правило, в норме для «цветения» характерны сезонная динамика, смена доминантов, существенные колебания численности и биомассы, изменение структуры, приводящие в конечном итоге к созданию своеобразной псевдоткани.

Впервые описание «цветения» пахотных почв было проведено в Англии в 1927 г. [1]. Отмечалось, что после продолжительных сильных дождей поверхность всего пшеничного поля была покрыта зеленовато-чёрным студенистым слоем толщиной около 1 мм, состоящим из водорослей. На необработанном участке водоросли образовывали более тонкий светло-зелёный слой, едва заметный невооружённым глазом. Между этими крайностями были все переходы на других участках, причём на тех, где было наибольшее количество азота, наблюдался максимальный рост водорослей.

Впоследствии наиболее детальные описания «цветения» пахотных почв с определением видового состава и численности водорослей и цианобактерий были проведены в Кировской области [2–4].

В настоящее время «цветение» почвы часто используют как диагностический признак при оценке её состояния [5], влияния на микробиоту не только абиотических факторов, но и различных агрохимикатов, поллютантов, высших растений [6, 7].

Одним из проявления «цветения» почвы служит образование биологических почвенных корок, которые являются неотъемлемой частью экосистем засушливых земель и часто включа-

ются в долгосрочные программы экологического мониторинга [8]. Среди доминирующих групп организмов, формирующих биологические почвенные корки, выделяются водоросли и цианобактерии, способные выступать в качестве «первопроходцев» в колонизации территорий, лишённых почвенного покрова [9].

Образование почвенно-водорослевых корок создаёт хорошие условия для дальнейшего развития почвы, поскольку способствует образованию органического вещества, ассоциации грибов с другими микроорганизмами. В регионах, подверженных техногенному загрязнению, водорослевые корки улавливают загрязняющие вещества из атмосферных выбросов. За счёт водорослевых корок в почве накапливаются минеральные агрегаты различного химического состава в сопровождении биотических конгломератов, спор и пыльцы, микроорганизмов, частиц целлюлозы и лигнина. Такой структурно и химически изменчивый субстрат обеспечивает лучшие условия для удержания воды и последующего развития органического компонента почвы [10]. Отмечается важная роль цианобактериальных корок в стабилизации ландшафта, а именно в защите почв от брызговой эрозии [11]. Также показано, что инокуляция цианобактериями потенциально может использоваться в качестве способа восстановления почв на засушливых территориях. При этом формирование почвенной биоплёнки улучшается в случае наличия растительного покрова, защищающего цианобактерии на поверхности от абиотических стрессов и процессов эрозии [12].

Однако исследований о влиянии на процессы «цветения» внесённых в почву гетеро-

трофных микробных культур (биопрепаратов различного назначения или провокационного заражения растений фитопатогенами), практически не встречается. Безусловно, интродукция любых микроорганизмов в почву, происходящая при предпосевной инокуляции семян, в первую очередь, влияет на ризосферную микробиоту. Но не исключена вероятность и того, что при развитии поверхностных разрастаний из внутрпочвенного пула водорослей и цианобактерий возможны определённые изменения, обусловленные прямым или косвенным влиянием интродуцентов.

Цель работы – сравнение видового состава и количественных параметров альгоцианобактериальных комплексов поверхностных разрастаний в посевах яровой пшеницы в вариантах с предпосевной инокуляцией семян различными микробными культурами.

Объект и методы исследований

Микроделяночный опыт с яровой пшеницей (*Triticum aestivum* L.) был заложен в 2023 г. на полях Федерального аграрного научного центра им. Н.В. Рудницкого совместно с сотрудниками лаборатории иммунитета и защиты растений Т.К. Шешеговой и Л.М. Щеклеиной.

В качестве предшественника выступал чистый пар. Почва опытных участков дерново-подзолистая, среднесуглинистая, сформированная на мергелизованных пермских глинах, слабосмытая высококультуренная (средний индекс окультуренности 0,83). Агрохимическая характеристика почвы: содержание гумуса – 3,56%; содержание подвижного фосфора – 334–349 мг/кг; обменного калия – 232–304 мг/кг почвы; рН солевой вытяжки – 5,0–5,4.

Для инокуляции семян использовали 3 штамма микроорганизмов как в монокультурах, так и в виде сочетаний. Изолят гриба К-01П, выделенный из почвы на берегу р. Мостовица в микрорайоне «Чистые пруды» г. Киров, по совокупности культуральных и морфологических признаков идентифицирован как представитель рода *Trichoderma* [13]. Вторым объектом была цианобактерия *Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. штамм 300, изолированная из дерново-подзолистой почвы в Кировской области. Оба штамма поддерживаются в коллекции микроорганизмов кафедры биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии Вятского государственного агротехнологического университета

на соответствующих питательных средах. В качестве фитопатогена использовали *Fusarium culmorum* Р-3/16, выделенный из зерна озимой ржи и хранящийся в коллекции лаборатории иммунитета и защиты растений ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого».

Повторность четырёхкратная, площадь делянок – 1 м². Посев проводили вручную 18 апреля 2023 г. в соответствии со схемой опыта: 1 – контроль (без обработки семян), 2 – *Trichoderma* spp., 3 – *F. muscicola*, 4 – *F. culmorum*, 5 – *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola*, 6 – *Trichoderma* spp.+ *F. culmorum*, 7 – *F. muscicola* + *F. culmorum*, 8 – *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola* + *F. culmorum*, 9 – эталон (обработка семян химическим фунгицидом «Максим», концентрат суспензии, действующее вещество – флудиоксонил). Инокуляция семян перед посевом заключалась в 30-минутном инкубировании семян в микробных суспензиях: *Trichoderma* spp., титр (7,15±0,96)·10⁷ кон./мл; *F. muscicola*, титр (1,15±0,18)·10⁷ кон./мл; *F. culmorum*, титр (8,90±0,34)·10⁵ кон./мл [14, 15]. Титры суспензий определяли путём подсчёта в камере Горяева в 4-х повторностях. Культуры *Trichoderma* spp. и *F. culmorum* выращивали на картофельно-глюкозном агаре, *F. muscicola* – на жидкой среде Громова № 6 без азота. В варианте № 5 семена выдерживали в смеси *Trichoderma* spp.+ *F. muscicola* в соотношении 1:1; в вариантах № 6, 7, 8 – замачивали в суспензиях антагонистов, затем подсушивали, после чего помещали в суспензию *F. culmorum*, имитируя заражение инфекцией. Инокулюм *Trichoderma* spp. и *F. culmorum* готовили путём смыва конидий стерильной водой с поверхности колоний на агаризованной среде. Перед замачиванием семян культуру *F. muscicola* гомогенизировали на малом гомогенизаторе MPW-302 (Польша). Время гомогенизации 3 минуты, режим скорости – 9000 об./мин. [16].

Отбор образцов «цветущей» почвы толщиной 5 мм проводили в день уборки урожая 9 августа 2023 г. Почву подсушивали при комнатной температуре до полного высыхания и оставляли на хранение в бумажных пакетах до начала проведения альгоцианобактериального анализа, который начали весной 2024 г. в период максимально интенсивной вегетации фототрофов.

Видовой состав водорослей и цианобактерий – достаточно постоянный признак для характеристики фитоценоза [3]. Изучение видового состава альгоцианофлоры проводили методами чашечных и водных культур.

Образцы «цветущей» почвы, по возможности в ненарушенном состоянии, одинаковой массы во всех вариантах (60 г), помещали в стерильные чашки Петри, увлажняли до 60% от полной влагоёмкости и на поверхность биоплёнки раскладывали покровные стёкла в количестве 4-х на чашку. Для приготовления водных культур использовали питательную среду Тамия. Чашки и колбы с культурами инкубировали при искусственном освещении люминесцентными лампами и естественном освещении. Культуры просматривали многократно за период их развития, начиная с 1–2 недель культивирования до 4-месячного возраста. Идентификация видов проводилась с использованием отечественных и зарубежных определителей. Количественный учёт водорослей и цианобактерий проводили после последней серии определения видового состава методом прямого счёта на мазках под микроскопом [4].

Результаты и обсуждение

Видовой состав альгоцианофлоры «цветущей» почвы был представлен 24 видами, в том числе: Cyanobacteria – 7; Chlorophyta + Streptophyta – 12; Bacillariophyta – 5 (табл. 1). По видовому разнообразию преобладали зелёные водоросли, что характерно для пахотных дерново-подзолистых почв региона. Цианобактерии представлены безгетероцистными формами (видами рода *Leptolyngbya* и *Phormidium*). Из диатомовых водорослей обнаружены *Hantzschia amphioxys* и *Luticola mutica*.

Во всех вариантах опыта были отмечены виды: *Leptolyngbya foveolarum*, *Leptolyngbya boryana*, *Klebsormidium flaccidum*, *Chlorococcum infusionum*, *Hantzschia amphioxys*, *Luticola mutica*.

Доминирующими видами практически во всех вариантах являлись зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *Chlorococcum infusionum* и цианобактерии: *Leptolyngbya foveolarum*, *Leptolyngbya boryana*, *Phormidium autumnale*.

Высокое сходство с контрольным вариантом имеют варианты: *Fischerella muscicola*, *Trichoderma* sp., фунгицид. Умеренное сходство с контролем в вариантах: *Fusarium culmorum*, *Trichoderma* sp., *Trichoderma + Fusarium culmorum* и *Trichoderma + Fusarium culmorum*, фунгицид. Сравнение вариантов между собой показало умеренное сходство, за исключением вариантов: *Fischerella muscicola* и *Fusarium culmorum + Fischerella muscicola*; *Trichoderma* sp. и *Fischerella muscicola*. Стопроцентное сходство альгоцианофлоры отмечено в вариан-

тах *Fischerella muscicola* и фунгицид; *Fusarium culmorum + Trichoderma + Fischerella muscicola* и фунгицид (табл. 2).

Определение численности водорослей и цианобактерий показало, что во всех вариантах плотность фототрофных популяций достигает нескольких миллионов клеток на 1 см² (табл. 3). Максимальные результаты зарегистрированы в контроле (свыше 8 млн кл./см²) и в варианте с тройной интродукционной смесью, включающей 2-х антагонистов (фишереллу и триходерму) и фитопатоген *F. culmorum* (свыше 5 млн кл./см²). Минимальная общая численность микрофитов характерна для варианта с обработкой посевов пшеницы фунгицидом, где определяемые показатели в 4 раза ниже контрольных.

Если сравнивать показатели численности по отдельным группам фототрофов, то, в первую очередь, следует отметить очень сильное угнетающее действие на зелёные нитчатые водоросли следующих групп интродуцированных микробов: *F. culmorum* и совместного применения фузариума с триходермой, а также фунгицида.

Диатомеи, как и одноклеточные зелёные водоросли, оказались сравнительно нейтральной группой, с небольшими колебаниями численности популяций в разных вариантах.

Группа цианобактерий оказалась чрезвычайно чувствительной к действию химического препарата. Примечательно также, что внесение в почву вместе с семенами чистой культуры цианобактерии в монокультуре, бинарной и тройной смеси к активации размножения цианобактерий в почве ни в одном варианте, по сравнению с контролем, не привело.

Изучение структуры поверхностных разрастаний показало, что только в одном варианте с монокультурой фузариума произошёл очень сильный сдвиг доминирования в сторону цианобактерий (с минимальной долей эукариотных водорослей). Не столь существенное, но всё-таки определённое преобладание цианобактерий по сравнению с контролем существует в вариантах с внесением в почву фишереллы как в монокультуре, так и в бинарной смеси с триходермой (табл. 4).

Таким образом, определение численности и структуры фототрофных микробных популяций показало, что интродуцированные микроорганизмы по-разному воздействуют на группы аборигенных почвенных фототрофов, что проявляется при их поверхностной вегетации. В первую очередь, это сказывается в некотором тормозящем эффекте по сравнению с контролем, причиной которого могут быть опреде-

Таблица 1 / Table 1
 Видовой состав альгоцианофлоры в контроле и вариантах опыта
 Species composition of algyocyanoflora in the control and experimental variants

№	Название видов Species name	Варианты / Variants								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cyanobacteria										
1	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W.et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+	-	+	+	+	-	-
2	<i>Leptolyngbya henningsii</i> Lem.	+	-	+	+	-	+	+	+	+
3	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenhorst ex Gom.) Anagn. et Kom.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>Leptolyngbya hollerbachiana</i> (Elenk.) Anagn. et Kom.	+	-	-	-	-	-	-	-	-
5	<i>Leptolyngbya boryana</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+	-	+	+	+	+	+
6	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	-	+	+	+	+	+	-	+	+
7	<i>Phormidium jadinianum</i> Gom.	-	-	-	-	+	-	+	-	-
Всего Cyanobacteria / Total Cyanobacteria		4	4	5	3	5	5	5	4	3
Chlorophyta + Streptophyta										
8	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	+	-	-	-	-	+	-	+	-
9	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer. var. <i>vulgaris</i>	+	-	+	+	-	-	+	-	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	<i>Cosmarium anceps</i> Lund	+	-	-	-	-	-	-	-	-
12	<i>Cosmarium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	-
13	<i>Chlorophyta</i> sp.	-	-	+	+	+	+	+	+	+
14	<i>Follicularia paradoxalis</i> Miller	+	+	+	-	+	-	+	+	+
15	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.	-	-	-	+	+	-	-	-	-
16	<i>Protosiphon</i> sp.	-	+	+	-	-	+	-	-	-
17	<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18	<i>Klebsormidium nitens</i> (Meneg. in Kütz.) Lokhorst	+	+	+	+	-	-	-	+	+
19	<i>Klebsormidium rivulare</i> (Kütz.) comb. nova	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Всего Chlorophyta + Streptophyta		8	5	7	7	5	5	6	7	6
Bacillariophyta										
20	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
21	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	+	+	+	+	+	+	+
22	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	-	+	-	-	+	-	-	-	-
23	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+	-	-	-	-	-	-	-
24	<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg	+	+	+	-	+	-	+	-	-
Всего Bacillariophyta / Total Bacillariophyta		4	5	3	2	4	2	3	2	2
Всего / Total		16	14	15	12	14	12	14	13	11

Примечание: 1 – контроль; 2 – *Trichoderma*; 3 – *Ficherella muscicola*; 4 – *Fusarium culmorum*; 5 – *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 6 – *Trichoderma* + *Fusarium culmorum*; 7 – *Fusarium culmorum* + *Ficherella muscicola*; 8 – *Fusarium culmorum* + *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 9 – fungicide. Знак «+» означает, что вид обнаружен, знак «-» – вид не обнаружен.

Note: 1 – control; 2 – *Trichoderma*; 3 – *Ficherella muscicola*; 4 – *Fusarium culmorum*; 5 – *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 6 – *Trichoderma* + *Fusarium culmorum*; 7 – *Fusarium culmorum* + *Ficherella muscicola*; 8 – *Fusarium culmorum* + *Trichoderma* + *Ficherella muscicola*; 9 – fungicide. “+” – the species is detected, “-” – the species is not detected.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты Жаккара альго-цианобактериальных комплексов «цветения» почвы
Jaccard indexes of algal-cyanobacterial complexes of the soil "blooming"

Вариант Variant	Контроль Control	<i>Tricho- derma</i> sp.	<i>Fische- rella</i> <i>musci- cola</i>	<i>Fusa- rium</i> <i>culmo- rum</i>	<i>Tricho- derma</i> + <i>Fi- scherella</i> <i>muscicola</i>	<i>Tricho- derma</i> + <i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>	<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>	<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>	Фунги- цид Fungi- cide
Контроль Control		85,7	92,8	60,0	52,9	60,0	85,7	78,6	91,7
<i>Tricho- derma</i> sp.			81,3	36,8	64,7	52,9	55,5	58,8	66,7
<i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>				58,8	45,0	68,7	70,6	75,0	100
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>					44,4	50,0	44,4	56,3	76,9
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>						52,9	64,7	50,0	56,3
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium</i> <i>culmorum</i>							52,9	66,7	64,3
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>								50,0	78,6
<i>Fusarium</i> <i>culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella</i> <i>muscicola</i>									100
Фунгицид Fungicide									

Таблица 3 / Table 3

Влияние интродуцированных в почву микроорганизмов на численность водорослей и цианобактерий в поверхностных разрастаниях (кл./см²·10³) / The effect of introduced into soil microorganisms on algae and cyanobacteria abundance in surface growths (cells/cm²·10³)

Вариант Variant	Водоросли / Algae			Цианобактерии Cyanobacteria	Всего Total
	зелёные одноклеточные green unicellular	зелёные нитчатые green filamentous	диатомовые diatom		
Контроль / Control	930±200	3000±300	300±15	3870±150	8100±665
<i>Trichoderma</i> sp.	1100±100	1230±30	270±50	2370±230	4970±660
<i>Fischerella muscicola</i>	830±25	1270±200	267±5	2730±500	5097±730
<i>Fusarium culmorum</i>	760±150	170±10	100±0	4170±160	5200±320
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	700±120	1230±150	230±50	3000±140	5160±460
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium culmorum</i>	630±100	1230±13	230±15	2730±250	4420±495
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	930±150	760±16	130±15	1931±200	3751±525
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	640±50	2800±400	100±0	2530±250	6070±700
Фунгицид / Fungicide	470±100	470±40	1000±0	770±150	1810±350

Таблица 4 / Table 4

Влияние интродуцированных в почву микроорганизмов на структуру фототрофных микробиомов поверхностных разрастаний (%) / The effect of microorganisms introduced into the soil on the structure of phototrophic microbiomes in surface growths (%)

Вариант / Variant	Водоросли / Algae	Цианобактерии / Cyanobacteria
Контроль / Control	52,2	47,8
<i>Trichoderma</i> sp.	53,7	46,7
<i>Fischerella muscicola</i>	40,1	59,9
<i>Fusarium culmorum</i>	19,8	80,2
<i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	41,9	58,1
<i>Trichoderma</i> + <i>Fusarium culmorum</i>	45,0	55,0
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	48,5	51,5
<i>Fusarium culmorum</i> + <i>Trichoderma</i> + <i>Fischerella muscicola</i>	58,3	41,7
Фунгицид / Fungicide	57,5	42,5

лётные типы отношений между аборигенной и интродуцированной микробиотой. Однако того репрессивного эффекта, который оказывает химический фунгицид, не наблюдается.

Выводы

Видовой состав почвенных микрофототрофов во всех вариантах опыта сохраняет достаточно высокое сходство с контролем, что указывает на постоянство сложившегося в пахотной почве микробиома.

Определение численности и структуры фототрофных микробных популяций показало, что интродуцированные микроорганизмы по-разному воздействуют на группы аборигенных почвенных фототрофов, что проявляется при их поверхностной вегетации.

В ходе исследования при постановке модельного опыта в оптимальных условиях влажности и освещения был выявлен потенциал возможной видовой реализации водорослей и цианобактерий и плотности популяции при формировании «цветения» почвы.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что, в отличие от применения химического пестицида для протравливания пшеницы, микробная инокуляция не приводит к катастрофическим изменениям как видового обилия, так и численности аборигенных водорослей и цианобактерий. При этом в различных вариантах имеются определённые флуктуационные колебания исследуемых параметров.

Наиболее сильное воздействие на структурные показатели альго-цианобактериальных комплексов имеет интродукция в почву фитопатогена *F. culmorum*, которая приводит к явному доминированию цианобактерий на фоне существенного снижения доли водорослей

в структуре микробных комплексов. Вероятная причина связана с давно установленной антагонистической активностью данного фитопатогенного гриба.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

Литература

1. Bristol Roach B.M. On the algae some normal English soils // J. Agric. Sci. 1927. V. 17. No. 4. P. 563–588. doi: 10.1017/S0021859600018839
2. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
3. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.
4. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. 336 с.
5. Штина Э.А. Почвенные водоросли как экологические индикаторы // Ботанический журнал. 1990. Т. 75. № 4. С. 441–453.
6. Безденежных К.А., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Ашихмина Т.Я. Альгологический мониторинг почв в районе объекта «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 81–88. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088
7. Кондакова Л.В., Дабах Е.В. Мониторинг альго-цианобактериальных сообществ на техногенной территории // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 84–90. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-084-090
8. Belnap J., Phillips S.L., Witwicki D.L., Miller M.E. Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated bio-

logical soil crusts // *J. Arid Environ.* 2008. V. 72. No. 7. P. 1257–1264. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.019

9. Büdel B., Dulić T., Darienko T., Rybalka N., Friedl T. Cyanobacteria and algae of biological soil crusts // *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands* / Eds. B. Weber, B. Büdel, L.J. Belnap. Springer, Cham, 2016. P. 55–80. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0_4

10. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2015. V. 22. No. 4. P. 675–690. doi: 10.1515/eces-2015-0041

11. Bullard J.E., Ockelford A., Strong C., Aubault H. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2018. V. 123. No. 12. P. 3697–3712. doi: 10.1029/2018JG004726

12. Román J.R., Chamizo S., Roncero Ramos B., Adessi A., De Philippis R., Cantón Y. Overcoming field barriers to restore dryland soils by cyanobacteria inoculation // *Soil Tillage Res.* 2021. V. 207. Article No. 104799. doi: 10.1016/j.still.2020.104799

13. Саттон Д., Фотергилл А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно патогенных грибов / Под ред. И.Р. Дорожковой. М.: Мир, 2001. 468 с.

14. Стариков П.А., Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Домрачева Л.И., Трефилова Л.В. Влияние микробной инокуляции семян на развитие грибных болезней яровой пшеницы // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 189–194.*

15. Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Стариков П.А. Влияние микробной инокуляции семян на биоконтроль корневых гнилей, биометрию растений и урожайность яровой пшеницы // *Таврический вестник аграрной науки.* 2024. № 1 (37). С. 187–197. doi: 10.5281/zenodo.10930956

16. Фокина А.И., Домрачева Л.И., Зыкова Ю.Н., Скугорева С.Г., Лялина Е.И., Трефилова Л.В. Совершенствование тетразолюно-топографического метода биотестирования с использованием цианобактерий // *Теоретическая и прикладная экология.* 2017. № 1. С. 31–41. doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

5. Shtina E.A. Soil algae as environmental indicators // *Botanicheskyy Zhurnal.* 1990. V. 75. No. 4. P. 441–453 (in Russian).

6. Bezdenezhnykh K.A., Kondakova L.V., Dabakh E.V., Ashikhmina T.Ya. Algological monitoring of soils in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 2. P. 81–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088

7. Kondakova L.V., Dabakh E.V. Monitoring of algacyanobacterial communities on the technogenic territory // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 1. P. 84–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-084-090

8. Belnap J., Phillips S.L., Witwicki D.L., Miller M.E. Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated biological soil crusts // *J. Arid Environ.* 2008. V. 72. No. 7. P. 1257–1264. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.019

9. Büdel B., Dulić T., Darienko T., Rybalka N., Friedl T. Cyanobacteria and algae of biological soil crusts // *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands* / Eds. B. Weber, B. Büdel, L.J. Belnap. Springer, Cham, 2016. P. 55–80. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0_4

10. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2015. V. 22. No. 4. P. 675–690. doi: 10.1515/eces-2015-0041

11. Bullard J.E., Ockelford A., Strong C., Aubault H. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2018. V. 123. No. 12. P. 3697–3712. doi: 10.1029/2018JG004726

12. Román J.R., Chamizo S., Roncero Ramos B., Adessi A., De Philippis R., Cantón Y. Overcoming field barriers to restore dryland soils by cyanobacteria inoculation // *Soil Tillage Res.* 2021. V. 207. Article No. 104799. doi: 10.1016/j.still.2020.104799

13. Sutton D., Fothergill A., Rinaldi M. The determinant of pathogenic and conditionally pathogenic fungi / Ed. I.R. Dorozhkova. Moskva: Mir, 2001. 468 p. (in Russian).

14. Starikov P.A., Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Domracheva L.I., Trefilova L.V. The influence of microbial inoculation of seeds on the development of fungal diseases of spring wheat // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 189–194 (in Russian).*

15. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Starikov P.A. Effect of microbial inoculation of seeds on root rot biocontrol, biometrical parameters and yield of spring wheat // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences.* 2024. No. 1 (37). P. 187–197 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.10930956

16. Fokina A.I., Domracheva L.I., Zykova Yu.N., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Trefilova L.V. Improving tetrazol-topographic method of biotesting using cyanobacteria // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 1. P. 31–41 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-031-041

References

1. Bristol Roach B.M. On the algae some normal English soils // *J. Agric. Sci.* 1927. V. 17. No. 4. P. 563–588. doi: 10.1017/S0021859600018839

2. Gollerbach M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).

3. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).

4. Domracheva L.I. “Blooming” of the soil and patterns of its development. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural RAS Department, 2005. 336 p. (in Russian).

Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги

© 2024. И. Н. Кутявин, к. с.-х. н., н. с., А. В. Манов, к. с.-х. н., н. с.,
В. В. Старцев, к. б. н., м. н. с., А. А. Дымов, д. б. н., доцент, в. н. с.,
Институт биологии ФИЦ Коми научный центр Уральское отделение РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kutjavin-ivan@rambler.ru

Формирование временной и пространственной дифференциации ценопопуляций лесных экосистем способствует непрерывному лесовозобновительному процессу в них. В работе приводятся результаты исследований по оценке возобновления до и после (предварительного и последующего) рубки в зависимости от нарушенности почвенного покрова лесозаготовительной техникой в первые три года после рубки леса. По морфологическим характеристикам и набору почвенных генетических горизонтов почву можно отнести к типичным подзолистым, которые развиваются на суглинистых почвообразующих породах в условиях хорошо дренируемых ландшафтов. Установлено, что почва пасечного участка морфологически близка к исходной почве, почвы волоков претерпели ряд изменений, как морфологических, так и химических. Ключевым отличием является изменение состава подстилки почвы пасечного участка после поступления большого количества порубочных остатков и изменения состава растений напочвенного покрова. Морфометрические показатели деревьев хвойно-лиственного древостоя и подроста характеризуются высокой лабильностью. Преобладают не крупные деревья и мелкий подрост. Древостой и подрост характеризуются как «здоровые». Начальный этап обследования возобновления на вырубке показал неравномерность заселения территории древесными растениями на большей части и отдельных технологических элементах. Относительно хорошая равномерность заселения её древесными растениями выявлена только на волоках в колеях с преимущественным возобновлением мелколиственных пород. При сильной захламлённости порубочными остатками вырубке возобновление отсутствует. На участках с выровненными колеями возобновительный процесс начинается только на третий год после рубки.

Ключевые слова: хвойно-лиственные насаждения, вырубки, размерная структура, лесовозобновление.

The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga

© 2024. I. N. Kutjavin ORCID: 0000-0002-7840-1934, A. V. Manov ORCID: 0000-0002-5070-0078,
V. V. Starcev ORCID: 0000-0002-6425-6502, A. A. Dymov ORCID: 0000-0002-1284-082X
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: kutjavin-ivan@rambler.ru

The work presents the results of experimental studies on assessment of preliminary and subsequent reforestation depending on the disturbance of the soil cover by logging equipment. The initial survey of the reforestation in the clearing showed the uneven settlement of the territory by woody plants in most parts and individual technological elements. According to morphological characteristics and a set of soil genetic horizons, the soil can be classified as typical Albic Retisols, which develop on loamy soil-forming rocks in well-drained landscapes. We found that the soil of the skidding trail is morphologically close to the original soil. The drag soils have undergone both morphological and chemical changes. The key difference is the change in the composition of the organic horizon following the arrival of a large amount of felling residues and changes in the composition of the ground cover plants. The morphometric parameters of the trees in the mixed stand and undergrowth are of high lability. The stand was dominated by small trees and small undergrowth. The stand and undergrowth are characterized as “healthy”. Relatively good uniformity of its settlement by woody plants was revealed only on portages in ruts with a predominant regeneration of small-leaved species. When the trails are heavily littered, there is no appearance of woody plants. There is no regeneration in the reclaimed felling areas in the first and second years. There is no resumption in sections with aligned tracks in the first and second year.

Keywords: mixed stands, cuttings, size structure, natural reforestation.

Периодические нарушения как естественного (природные пожары, ветровалы, болезни, вспышки размножения насекомых-вредителей, экстремальные погодные условия и естественная гибель старых деревьев), так и антропогенного (рубки) происхождения формируют в таёжных массивах мозаику лесных сообществ, находящихся на разных стадиях восстановительной сукцессии [1]. Благодаря формированию временной и пространственной дифференциации ценопопуляций лесных экосистем лесовозобновительный процесс в них непрерывен. Этим определяется разновозрастность и разнородность размеров деревьев, а также горизонтальная и вертикальная расчленённость полога древостоев [2, 3]. Понимание ведущих факторов формирования структуры и функционирования лесных биогеоценозов в условиях периодических нарушений среды позволяет расширить взгляды на природу лесов Севера. На основе этих знаний возможна разработка региональных подходов к повышению устойчивости, продуктивности и эффективному воспроизводству лесных экосистем [4]. Хвойно-лиственные насаждения в настоящее время требуют более детального рассмотрения их структуры и продуктивности. Такие древостои обычно формируются после пожаров и в последнее время, на месте вырубок образуя сложные по составу продуктивные насаждения [5].

Одним из основных факторов, влияющих на успешность последующего возобновления во всех типах леса, является степень повреждённости напочвенного покрова и трансформация верхних горизонтов почвы [6–12]. На территории Сибири влияние механической заготовки древесины на почвенные условия лесовозобновления проанализировано в работе [13]. На европейском Севере детально проанализирован пятнадцатилетний процесс формирования напочвенного покрова на ранних стадиях после рубки [14].

При сильном нарушении почвы (её уплотнении при трелёвке леса, захламлении порубочными остатками) снижаются качественные и количественные характеристики лесовозобновления [7, 9, 13, 15, 16]. Самосев последующего возобновления на вырубках характеризуется различными показателями роста, что связано с неоднородностью водно-физических и химических свойств верхних горизонтов почвы. Такая неоднородность вызывается неодинаковым воздействием на микрорельеф лесозаготовительной техники. При трелёвке леса происходит уплотнение

почвы, тем самым в верхних её горизонтах снижается влажность и скважность [13, 17–21].

Цель работы – провести оценку начального этапа возобновления леса до и после рубки в зависимости от нарушенности почвенного покрова лесозаготовительной техникой.

Объекты и методы исследования

Перед рубкой в хвойно-лиственном насаждении была заложена постоянная пробная площадь (ППП) по форме трансекты размером 200×20 м (0,4 га) по направлению с севера на юг. Согласно общепринятым методам на ППП проводился сплошной перебор деревьев по диаметру, высоте и состоянию [22]. Подрост учитывали на трёх участках (по краям и в центре ППП) общей площадью 0,15 га. Его оценивали по породе, высоте и категории состояния. К древостою относили деревья с диаметром ствола на высоте 1,3 м \geq 6 см. Остальную часть деревьев относили к подросту. Возраст деревьев устанавливали путём подсчёта годичных слоёв на образцах древесины (кернах), отобранных возрастным буром у 20% деревьев, составляющих древесный ярус.

Описание жизненного состояния деревьев в хвойно-лиственном древостое проводили в соответствии с методикой, используемой в международной программе-методике ICP-Forests [23]. Методика основана на визуальной оценке состояния дерева. Выделяют следующие состояния: 0 класс – здоровое дерево (нет внешних признаков повреждения кроны и ствола, любые повреждения хвои < 10% по отношению ко всей массе ассимиляционного аппарата не сказываются на состоянии дерева); I класс – слабо повреждённое дерево (повреждение по одному или сумме всех признаков составляет 11–25%); II класс – средне повреждённое дерево (26–60% повреждений); III класс – сильно повреждённое (отмирающее) дерево (61–99% повреждений); IV класс – отмершее дерево (100% повреждений). Отмершие деревья делятся на IVa (свежий сухостой) и IVб (старый сухостой – нет хвои, постепенно отпадают ветви и кора). Согласно [24], старый сухостой практически не влияет на повреждённость древостоя в целом, но при расчёте необоснованно снижает его жизненное состояние, поэтому при анализе жизненного состояния учитывался только свежий сухостой.

Для оценки жизненного состояния древостоев рассчитывали индекс его повреждённости по формуле 1 средневзвешенного класса

повреждения составляющих древостой деревьев [25], причём для получения более точных результатов за основу расчёта брали не число деревьев разных классов повреждения, а их запас стволовой древесины [24]:

$$I = \frac{\sum_{i=0}^4 i \cdot v_i}{V}, \quad (1)$$

где I – индекс повреждённости древостоя, балл; i – номера классов повреждения деревьев, баллы от 0 до 4; v_i – стволовой запас древесины деревьев i -го класса повреждения, м³/га; V – общий запас древостоя, м³/га. С учётом величины индекса повреждённости древостой классифицировали на следующие категории: «здоровый древостой» (0–0,5), «ослабленный древостой» (0,6–1,5), «сильно ослабленный древостой» (1,6–2,5), «отмирающий древостой» (2,6–3,5) и «сухостой» (> 3,6) [25].

На каждой пробной площади проведён сплошной перебор подроста. К подросту относили древесные растения высотой более 0,25 м и диаметром до 6 см на высоте 1,3 м. Подрост подразделяли на здоровый, сомнительный (ослабленный), усыхающий и сухой. Жизненное состояние подроста определяли по методике [24]. При этом жизнеспособность здоровых экземпляров приравнивалась к 100%, ослабленных – к 70, усыхающих – к 10, сухих – 0%. Количественные значения показателей жизненного состояния всей ценопопуляции подроста находили по формуле 2 [26]:

$$L_n = \frac{100n_1 + 70n_2 + 10n_3}{N}, \quad (2)$$

где L_n – относительное жизненное состояние подроста в момент наблюдения; n_1 , n_2 , n_3 – число здоровых, ослабленных и усыхающих особей подроста на 1 га соответственно; N – общее количество подроста, включая сухостой, на 1 га. При показателе $L_n = 100$ –80% ценопопуляцию считали здоровой, при 79–50 – ослабленной, при 49–20 – сильно ослабленной и ниже 20% – разрушенной.

Анализ размерной структуры древесных растений изучаемого хвойно-лиственного насаждения основан на изменчивости запасов стволовой древесины древостоя и высоты подроста. Для количественной оценки размеров древесных растений в насаждении применяли статистические показатели асимметрии (A), эксцесса (E) и коэффициента вариации (CV), которые рассматривались нами по [27].

Осенью 2020 г. насаждение было вырублено с использованием многофункциональной колёсной техники, марки Ponsse (харвестер + форвардер). На вырубке был организован экспериментальный участок с различным числом проездов форвардера по волокам (3 и 10 проходов). Также 4 волока с 10 проездами форвардера были выровнены с использованием экскаватора с уборкой порубочных остатков до минерального горизонта почвы.

Оценка возобновления на вырубке проводилась по методике [13]. На вырубке была проведена закладка учётных пробных площадок (УПП) размером 1×1 м с чередованием пасака-волока в количестве 56 штук. Так как практически вся вырубка имеет неоднородность в рельефе, маршрутный ход был заложен вдоль ранее заложенной трансектной ППП от верхней части вырубки до предпойменного водотока ручья с максимальным охватом обследуемой вырубки. На каждой из заложенных площадок давалось описание места расположения УПП относительно рельефа (склон, терраса и т. д.).

После рубки в период с 2021 по 2023 гг. на вырубке в весенний и осенний периоды были проведены учёты естественного возобновления. Данный способ позволяет установить количественный и качественный состав естественного возобновления на вырубке до начала роста древесной растительности и после его окончания, и выявить причины гибели возобновления в зимний и летний периоды. Постоянные наблюдения за возобновлением на вырубке позволяют познать динамику сукцессионных процессов на нарушенных ландшафтах.

Согласно почвенно-географическому районированию, исследуемая территория расположена в южной части Вымь-Вычегодского округа типичных подзолистых почв, иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв [28]. На исследуемом участке до рубки развивалась типичная подзолистая почва. Для почв данного типа характерна типичная лесная подстилка, под которой формируется белёсый элювиальный горизонт ЕL, представленный бесструктурным суглинистым материалом. Под ним формируется субэлювиальный горизонт ВЕL более тяжёлого гранулометрического состава. Под элювиальной толщей формируется коричневато-бурый среднесуглинистый текстурный горизонт ВТ с типичной для почв отдела многопорядковой структурой. Почва па-

сечного участка после рубки остаётся близкой к фоновой по морфологическим свойствам. Основные отличия затрагивают органогенный горизонт, который был подвержен поступлению порубочных остатков, хвои, листьев и трав. Для верхнего минерального горизонта ЕL наблюдается увеличение содержания органического вещества по сравнению с фоновой почвой. Нижние минеральные горизонты не претерпели изменений.

На волоках с тремя проходами колёсной лесозаготовительной техники также развивается подзолистая почва, которая практически не претерпела морфологических изменений по сравнению с почвой исходного леса. На волоках с десятью проходами форвардера формируется турбозём детритный, который характеризуется наличием перемешанного с подстилкой и порубочными остатками турбированного горизонта TUR_{cwd} в верхней части почвенного профиля. Участки, на которых проводили выравнивание колеи, характеризуются отсутствием подстилки и порубочных

остатков в турбированном горизонте TUR, верхняя часть почвенного профиля механически нарушена, почва диагностирована как турбозём. Более подробно почвы исследуемого участка описаны в наших предыдущих работах [29–31].

Результаты и обсуждение

Обследованное разновозрастное хвойно-лиственное насаждение до рубки было пройдено низовыми пожарами различной интенсивности и выборочной рубкой (около 100 лет назад) крупных хвойных деревьев. Древесный ярус был образован сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), берёзой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и берёзой повислой (*B. pendula* Roth.). В качестве небольшой примеси присутствовали пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и осина (*Populus tremula* L.). Ярусность в древостое не выражена. Сухостой и валёж образуют преимущественно хвойные

Таблица 1 / Table 1

Таксационная характеристика древостоя и подроста хвойно-лиственного насаждения
Taxation characteristics of the mixed stand and undergrowth

Компоненты вырубki Cutting components	Состав древостоя и подроста Composition of forest stands and undergrowth	Порода Tree species	Густота, экз./га Density, trees/ha	Запас стволовой древесины, м³/га Growing stock, m³/ha	Средние / Mean	
					высота, м height, m	диаметр на высоте 1,3 м, см diameter at a height of 1.3 m, cm
Древостой Stand	4СЗЕ2Б1Ос ед.Пх	С	355	111	19	19
		Е	1063	90	11	11
		Пх	3	0,03	6	7
		Б	317	55	15	15
		Ос	23	26	19	23
		Всего Total	1761	282	–	–
Подрост Undergrowth	10Е+Б,Ос	Е	2653	–	1,4	–
		Б	93	–	4,4	–
		О	93	–	0,4	–
		Всего Total	2839	–	–	–

Примечание. Состав древостоя и подроста состоит из буквенного названия древесной породы (С – сосна; Е – ель, Пх – пихта; Б – берёза повислая, пушистая, Ос – осина) и коэффициента состава. Одна единица коэффициента состава соответствует 10% запаса соответствующего вида в общем запасе. Знак «+» – доля участия породы – 2–5%, «ед.» (единично) – доля участия породы <2%. Прочерк указывает на отсутствие данных.

Note. The formula for the forest stand composition: С – *Pinus sylvestris*; Е – *Picea obovata*; Пх – *Abies sibirica*; Б – *Betula pubescens*, В. *pendula*; Ос – *Populus tremula*. One composition coefficient unit corresponds to 10% of the corresponding species stock in the total growing stock. The participation share of species: “+” – 2–5%; “ед.” – <2%. Dash – indicates no data.

Таблица 2 / Table 2

Статистические характеристики строения древостоя по объёму ствола (m^3) и подроста по высоте (м) хвойно-лиственного насаждения / Statistical characteristics of forest stand structure by trunk volume (m^3) and undergrowth by height (m) of a mixed forest stand

Древесные растения Tree species	Параметр Statistical parameters	Все породы All trees	Основные породы / Dominant trees		
			сосна <i>Pinus sylvestris</i>	ель <i>Picea obovata</i>	берёза <i>Betula pubescens</i> , <i>B. pendula</i>
Деревья Trees	$M \pm m_M$	0,160±0,007	0,310±0,018	0,080±0,005	0,170±0,017
	CV	123	70	120	107
	A	2,7	1,1	2,5	2,4
	E	12,7	1,6	7,2	8,2
Подрост Undergrowth	$M \pm m_M$	1,44±0,07	1,38±0,06	–	–
	CV	95	88	–	–
	A	1,7	1,4	–	–
	E	2,9	1,4	–	–

Примечание: M – среднее значение; m_M – стандартная ошибка среднего значения; CV – коэффициент вариации, %; A – асимметрия; E – эксцесс. Прочерк указывает на отсутствие данных.

Note: M – mean value; m_M – standard error of the mean value; CV – coefficient of variation, %; A – asymmetry; E – excess. Dash indicates no data.

деревья со стволовым запасом древесины 30 m^3 /га. В подросте доминировала ель с небольшой примесью берёзы и осины (табл. 1).

Размеры стволов деревьев – один из наиболее лабильных показателей компонентов структуры древостоев, даже в одновозрастных насаждениях. Дифференциация размеров деревьев в древостоях влияет на режим использования наземных экологических и почвенных питательных ресурсов ценозов, что может оказать существенное влияние на конкурентные взаимоотношения между растениями за свет и минеральные вещества [32].

Структура распределения деревьев по объёму стволов в древостое хвойно-лиственного насаждения показывает очень высокую их вариабельность ($CV > 100\%$). Наименее изменчивой по объёму ствола является сосна, наибольшая вариабельность этого показателя у ели (табл. 2). Преобладают деревья меньше среднего объёма, что характеризуется большой правосторонней асимметрией ($A > 0$), что говорит о преобладании в древостое мелких по объёму деревьев. При этом ряды распределения объёмов стволов очень густо сгруппированы около среднего значения, о чём свидетельствует высокий показатель эксцесса ($E > 0$).

Под пологом хвойно-лиственного древостоя развивается подрост преимущественно из ели (табл. 1). Его вариабельность по высоте значительная ($CV > 80\%$). Преобладает подрост ниже средней высоты ($A > 0$), он сгруппирован ($E > 0$) около среднего значения (табл. 2).

Исследуемое нами хвойно-лиственное насаждение находится вне зоны воздействия

аэротехногенных загрязнителей. Следовательно, факторами, определяющими жизненное состояние деревьев и подроста, являются местные экологические условия, создающиеся как в пологе древостоя, так и в почве. Поэтому район исследований можно отнести к условно-фоновому.

Согласно индексам повреждённости [25], рассчитанным по данным классов повреждения [23], изучаемый хвойно-лиственный древостой относится к категории «здоровый» с индексом повреждённости равным 0,3.

Ценопопуляция подроста хвойно-лиственного насаждения до рубки характеризовалась высоким уровнем жизненного состояния. Рассчитанное по приведённой выше формуле [26] значение соответствующего индекса жизненного состояния (L_n) подроста равно 83%, что характеризует его ценопопуляцию как «здоровая».

Первичное пострубочное обследование возобновления (2021 г.) показало на большей части вырубке и её технологических элементах неравномерность распределения заселения территории древесными породами. Отмечается преобладание в возобновлении мелколиственных пород в количестве 23 тыс. экз./га (рис.). При сильной захламлённости на волоках возобновление отсутствует, что требует дополнительных мероприятий для улучшения возобновления на этих технологических элементах вырубке. Сохранившийся после рубки подрост ели находится в неудовлетворительном состоянии и по мере увеличения крупности по высоте переходит

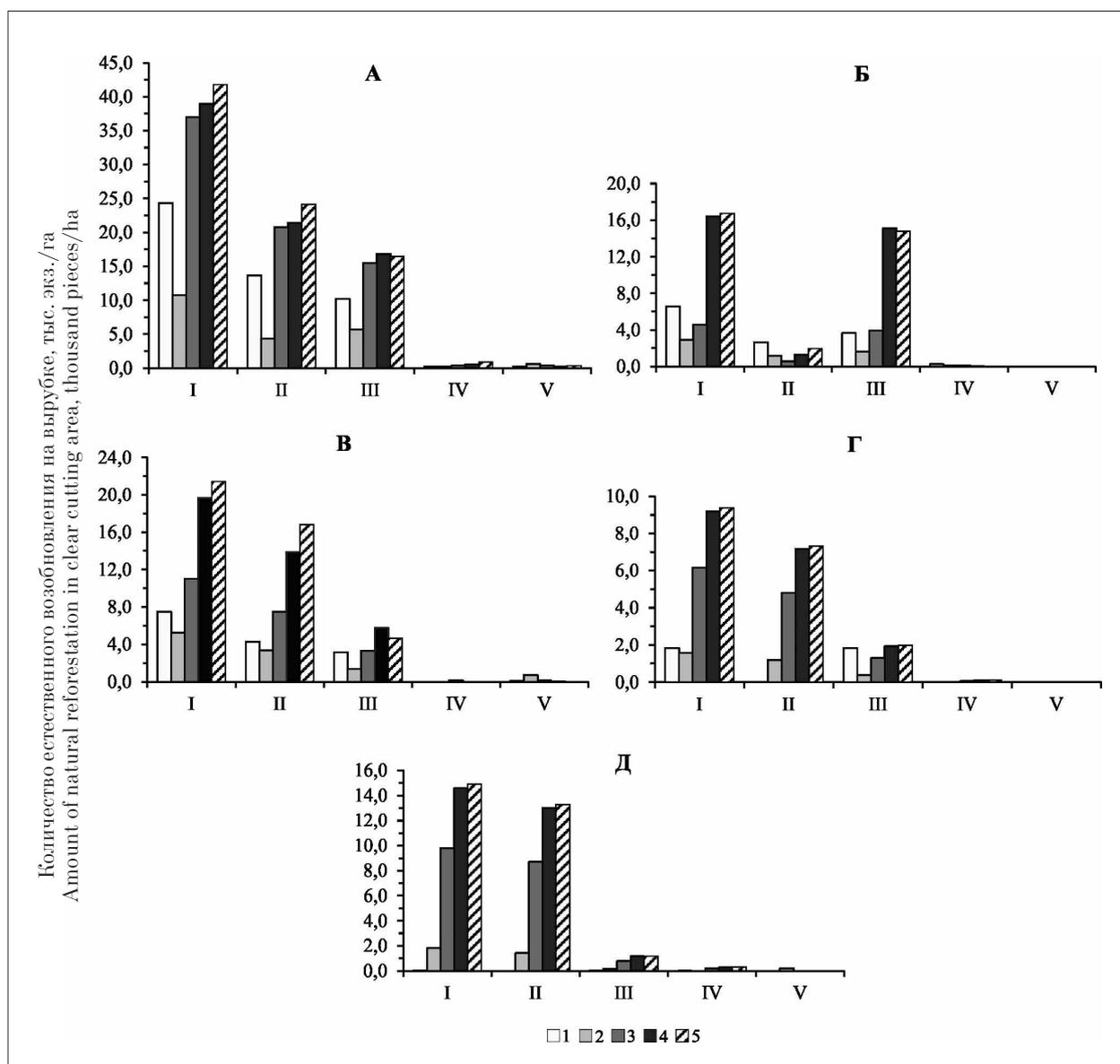


Рис. Динамика естественного возобновления на вырубке: А – общее на вырубке, Б – на пасеках, В – на волоках, Г – на волоках с тремя проходами форвардера, Д – на волоках с 10 проходами форвардера. Учёт подроста: 1 –осенью 2021 г., 2 – весной 2022 г., 3 – осенью 2022 г., 4 – весной 2023 г., 5 – осенью 2023 г. I – всего, II – берёза, III – осина, IV – ель, V – сосна
Fig. The dynamics of natural reforestation in clearing: A – general in clearing, B – in the skidding trails, C – in drags, D – in drags with 3 forwarder passes, E – in drags with 10 forwarder passes. Registration of undergrowth: 1 – autumn 2021, 2 – spring 2022, 3 – autumn 2022, 4 – spring 2023, 5 – autumn 2023. I – Total, II – *Betula*, III – *Populus*, IV – *Picea*, V – *Pinus*

от категории «сомнительный» до категорий «усыхающий» и «сухой».

Обследование 2022 г. показало, что в составе подроста идёт активное увеличение доли мелколиственных древесных растений (осины и берёзы). По сравнению с 2021 г., весенний учёт 2022 г. показал снижение количества подроста более чем в два раза, с 24,3 до 10,7 тыс. экз./га (рис.). Однако, количество возобновления (всходы, поросль) на вырубке за летний период 2022 г.

увеличилось до 20,8 тыс. экз./га. За летний период 2022 г. более интенсивное возобновление шло преимущественно берёзой семенного происхождения на волоках с десятью проходами. Это обусловлено лучшей минерализацией колейного пространства по сравнению с волоками подвергшихся воздействию трёх проходов лесозаготовительных машин. На пасеках возобновление идёт в основном порослевой осинкой и реже берёзой, появившейся от пня.

Небольшое количество возобновления наблюдается на волоках с десятью проходами форвардера. В первый год после рубки на волоках с 3 и 10 проходами в возобновлении участвует только порослевая осина, на второй год преобладают всходы берёзы. Количество всходов хвойных (ель, сосна) минимальное. На выровненных волоках в осенний период 2023 г. отмечено начало слабого лесовозобновления, что, видимо, связано с образованием живого напочвенного покрова и отсутствием семян древесных растений. В весенний и осенний период 2023 г. отмечается равномерное накопление подроста до 42 тыс. экз./га.

По данным [14], на вырубках Архангельской области количество подроста на пасаеках выше, чем на волоках. Это объясняют сохранившейся частью подроста предварительной генерации и переуплотнённой почвой в колежном пространстве волока. Согласно нашим результатам, лучшее возобновление отмечается на волоках с числом проходов от 3 до 10 раз, что обусловлено удалением подстилочного горизонта до минерального слоя почвы в колеях.

Согласно данным [20], лучшим ростом сосновых молодняков лишайниковых вырубков характеризуются участки, где верхние горизонты при механическом воздействии были сгружены и перемешаны с напочвенным покровом и порубочными остатками. Автор отмечает, что на этих микроучастках на глубине 8–12 см аккумулируется большая часть гидролизуемого азота, что подтверждается нашими исследованиями органического вещества почв вырубков [19, 29], в которых наблюдается значительное увеличение углерода и азота в верхних минеральных горизонтах по сравнению с фоновыми почвами.

Исследования естественного возобновления сосны обыкновенной в ленточных борах Алтайского края, пройденных рубками, показали, что лучшее возобновление идёт после выборочных рубок, что обусловлено сохранением среды и устойчивости древостоев. При постепенных рубках процесс лесовосстановления затруднён и растягивается на неопределённое время [32]. Отмечено, что в условиях ленточного бора процесс возобновления протекает неравномерно и находится в тесной зависимости от проективного покрытия живого напочвенного покрова.

Исследования [22] показали, что на вырубках папоротниковых типов леса Сибири при летних лесозаготовках на волоках с ухудшением почвенных условий в течение

трёх лет идёт заселение злаковой растительностью, занимающей до 5–10% площади. В первый год после рубки на волоках обильно возобновляется самосев лиственных пород до 30 экз./м². Автор отмечает, что для подростка кедра в возрасте 10–13 лет, вышедшего из-под трав, характерна высокая энергия роста. К 10–12 годам суммарное количество подростка как предварительного, так и последующего возобновления в зеленомошной группе типов леса достигает 2,0, в крупнопоротниковой – 0,5 тыс. экз./га.

Заключение

Таким образом, морфометрические показатели деревьев подростка, развивающихся под пологом хвойно-лиственного древостоя, характеризуются высокой лабильностью. Преобладают некрупные деревья и мелкий подрост. Древостой и подрост характеризуются как «здоровые». Проведённые трёхлетние (2021–2023 гг.) весенне-осенние обследования возобновления на вырубке показали значительную гибель поросли осины и берёзы после объедания их животными. Всходы берёзы, сосны и ели в основном отмирают в результате выжимания их из почвы морозным пучением. Усиленное возобновление отмечено от стен леса в нижней части вырубке. На данный момент установлено, что на второй и третий год после рубки лесовозобновительный процесс находится на стадии увеличения количества деревьев лиственных пород, преимущественно берёзы семенного происхождения (рис.).

Начальный этап обследования возобновления на вырубке показал, что на большей части и отдельных технологических элементах существует неравномерность заселения территории древесными растениями. Относительно хорошая равномерность поселения выявлена только на волоках в колеях. Отмечается преобладание в возобновлении мелколиственных пород. При сильной захлащённости на волоках появление древесных растений отсутствует, что требует дополнительных мероприятий для улучшения возобновления их на этих технологических элементах вырубке. На участках вырубке, где было проведено выравнивание, в первый и второй год после рубки возобновление отсутствует или протекает слабо. На основании проведённых исследований можно констатировать, что выравнивание волоков не оказывает положительного влияния на эффективность естественного лесовозобновления первые три года. Заторможенное естествен-

ное возобновление на оголённых участках суглинистых почв связано с криогенным выжиманием всходов из почв в зимний период. Последующие наблюдения за процессом развития древесных растений на вырубке позволят лучше познать процесс восстановительных сукцессий нарушенных рубкой ландшафтов бореальной зоны.

Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной академии наук № 23-74-10007, <https://rscf.ru/project/23-74-10007/>.

Литература

1. Громцев А.Н. Основы ландшафтной экологии европейских таёжных лесов России. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 226 с.
2. Дыренков С.А. Структура и динамика таёжных ельников. Л.: Наука, 1984. 176 с.
3. Цветков В.Ф. Лесовозобновление: природа, закономерности, оценка, прогноз. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2008. 211 с.
4. Санникова Н.С., Локосова Е.И. Микроэкологический анализ структурно-функциональных связей в лесных биогеоценозах // Генетические и экологические исследования в лесных экосистемах. Екатеринбург, 2001. С. 73–94.
5. del Río M., Pretzsch H., Alberdi I., Bielak K., Bravo F., Brunner A., Condés S., Ducey M.J., Fonseca T., von Lüpke N., Pach M., Peric S., Perot T., Souidi Z., Spathelf H., Sterba H., Tijardovic M., Tomé M., Vallet P., Bravo-Oviedo A. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives // Eur. J. Forest Res. 2016. V. 135. No. 1. P. 23–49. doi: 10.1007/s10342-015-0927-6
6. Мелехов И.С. Изучение концентрированных рубок и возобновление леса в связи с ними в таёжной зоне // Концентрированные рубки в лесах Севера. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1954. С. 5–47.
7. Обыденников В.И. Последствия использования новых машин в северотаёжных сосняках // Лесное хозяйство. 1979. № 11. С. 18–21.
8. Ларин В.Б. Ход естественного возобновления на вырубках из-под ельников // Трансформация экосистем Севера в зоне интенсивной заготовки древесины. Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, 1979. С. 78–89.
9. Лазарев И.П., Зябченко С.С. Воздействие лесозаготовительной техники на почву при рубке основных лесов // Влияние хозяйственных мероприятий на лесные почвы Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, Ин-т леса, 1983. С. 112–129.
10. Козобродов А.С., Климов Р.Н. Влияние современных технологий разработки лесосек на водно-физические свойства почв и лесовосстановление // Почвенные исследования на Европейском Севере России. Архангельск: Издательский дом «ЭЛПА», 1996. С. 138–144.
11. Цветков В.Ф. Сосняки Кольской лесорастительной области и ведение хозяйства в них. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 380 с.
12. Ильинцев А.С., Наквасина Е.Н. Образование колейности при проходе лесозаготовительной техники в ельниках на двучленных породах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. № 237. С. 168–182. doi: 10.21266/2079-4304.2021.237.168-182
13. Побединский А.В. Рубки и возобновление в таёжных лесах СССР. М.: Лесная промышленность, 1973. 199 с.
14. Ильинцев А.С. Влияние современных лесозаготовок на нарушение почвы, состояние живого напочвенного покрова и последующее возобновление деревьев в бореальных лесах России // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155. № 3–4. С. 62–73. doi: 10.31857/S0869607123030072
15. Цветков В.Ф., Семенов Б.А. Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.
16. Иванов В.В. Экологические последствия механизированных лесозаготовок в южной тайге Красноярского края // Лесоведение. 2005. № 2. С. 3–8.
17. Исаев В.И. Влияние механизированных лесозаготовок на изменение водно-физических свойств почвы, сток и возобновление леса // Состояние возобновления и пути формирования молодняков на концентрированных вырубках северо-запада европейской части СССР: тезисы докл. к Всесоюз. совещ. Архангельск, 1971. С. 287–289.
18. Морозова Р.М. Изменение процессов почвообразования под влиянием концентрированных рубок // Возобновление леса на вырубках и выращивание сеянцев в питомниках. Петрозаводск: Карел. кн. изд-во, 1964. С. 55–73.
19. Dymov A.A., V.V. Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (middle taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. No. 11. P. 1633–1646. doi: 10.1134/S1064229322110023
20. Листов А.А. Боры-беломошники. М.: Агропромиздат, 1986. 179 с.
21. Бабинцева Р.М. Динамика живого напочвенного покрова на вырубках кедровых древостоев в северной части Западного Саяна // Возобновление в лесах Сибири. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1965. 283 с.
22. Загребев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
23. Cools N., de Vos B. Sampling and analysis of soil // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air

pollution on forests. Part 10. Hamburg: UNECE, ICP Forests, 2010. 208 p.

24. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

25. Алексеев А.С. Мониторинг лесных экосистем. СПб: ЛТА, 1997. 114 с.

26. Цветков П.А., Киришева Д.А. Влияние рекреации на естественное возобновление сосны обыкновенной // Хвойные бореальные зоны. 2004. № 2. С. 61–65.

27. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: Архангельский государственный технический университет, 2002. 112 с.

28. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с.

29. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // Eurasian Soil Science. 2024. V. 57. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064

30. Огородняя С.А., Бутылкина М.А., Красиков С.Р., Дымов А.А. Физические свойства минеральных горизонтов почв вырубки (средняя тайга, Республики Коми) // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2024. Т. 79. № 2. С. 15–25. doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25

31. Pretzsch H., Schütze G. Effect of tree species mixing on the size structure, density, and yield of forest stands // Eur. J. Forest Res. 2016. V. 135. No. 1. P. 1–22. doi: 10.1007/s10342-015-0913-z

32. Малиновских А.А., Маленко А.А. Влияние живого напочвенного покрова на процесс естественного возобновления сосны обыкновенной после рубок в спелых и перестойных насаждениях в ленточных борах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 12. С. 58–64.

References

1. Gromtsev A.N. Fundamentals of landscape ecology of European taiga forests of Russia. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS, 2008. 226 p. (in Russian).

2. Dyrenkov S.A. Structure and dynamics of taiga spruce forests. Leningrad: Nauka, 1984. 176 p. (in Russian).

3. Tsvetkov V.F. Forest regeneration: nature, regularities, assessment, forecast. Arkhangelsk: AGTU Publishing, 2008. 212 p. (in Russian).

4. Sannikova N.S., Lokosova E.I. Microecosystem analysis of structural and functional relationships in forest biogeocenoses // Genetic and ecological studies in forest ecosystems. Ekaterinburg, 2001. P. 73–94 (in Russian).

5. del Rio M., Pretzsch H., Alberdi I., Bielak K., Bravo F., Brunner A., Condés S., Ducey M.J., Fonseca T., von Lüpke N., Pach M., Peric S., Perot T., Souidi Z., Spathelf H., Ster-

ba H., Tijardovic M., Tomé M., Vallet P., Bravo-Oviedo A. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives // Eur. J. Forest Res. 2016. V. 135. No. 1. P. 23–49. doi: 10.1007/s10342-015-0927-6

6. Melekhov I.S. Study of concentrated cuttings and forest regeneration in connection with them in the taiga zone // Concentrated cuttings in the forests of the North. Moskva: ANS SSSR, 1954. P. 5–47 (in Russian).

7. Obydennikov V.I. Impacts of new machine use in the northern taiga pine forests // Lesnoe hozyajstvo. 1979. No. 11. P. 18–21 (in Russian).

8. Larin V.B. Progress of natural regeneration on clearcuts under spruce forests // Transformation of Northern ecosystems in the zone of intensive timber harvesting. Syktывkar: Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS, 1997. P. 78–89 (in Russian).

9. Lazarev I.P., Zybchenko S.S. Impact of logging equipment on soil during cutting of pine forests // Impact of economic activities on forest soils of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR AS, Institute of Forestry, 1983. P. 112–129 (in Russian).

10. Kozobrodov A.S., Klimov R.N. Impact of modern logging technologies on soil water-physical properties and reforestation // Soil research in the European North of Russia. Arkhangelsk: Publishing house “ELPA”, 1996. P. 138–144 (in Russian).

11. Tsvetkov V.F. Pine forests of the Kola forest region and management in them. Arkhangelsk: ASTU Publishing, 2002. 380 p. (in Russian).

12. Ilintsev A.S., Nakvasina E.N. Rut formation after the passage of logging machinery in spruce forests on binomial soils // Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2021. No. 237. P. 168–182 (in Russian). doi: 10.21266/2079-4304.2021.237.168-182

13. Pobedinsky A.V. Cuttings and renewal in the USSR taiga forests. Moskva: Lesnaya promyshlennost, 1973. 199 p. (in Russian).

14. Ilintsev A.S. The impact of modern logging on soil disturbance, the state of ground cover and the subsequent regeneration of trees in boreal forests of Russia // Proceedings of the Russian Geographical Society. 2023. V. 155. No. 3–4. P. 62–73 (in Russian). doi: 10.31857/S0869607123030072

15. Tsvetkov V.F., Semyonov B.A. Pine forests of the Far North. Moskva: Agropromizdat, 1985. 116 p. (in Russian).

16. Ivanov V.V. Ecological consequences of mechanized logging operations in the southern taiga of Krasnoyarsk Krai // Lesovedenie. 2005. No. 2. P. 3–8 (in Russian).

17. Isaev V.I. Impact of mechanized logging on changes in water-physical properties of soil, runoff and forest regeneration // State of regeneration and ways of formation of young trees on concentrated clearcuts in the north-west of the European part of the USSR: tezisy

dokladov k Vsesoyuznomu soveshchaniyu. Arkhangelsk, 1971. P. 287–289 (in Russian).

18. Morozova R.M. Changes in soil formation processes under the influence of concentrated felling // Reforestation on clearcuts and cultivation of seedlings in nurseries. Petrozavodsk: Karelian Book Publishing, 1974. P. 55–73 (in Russian).

19. Dymov A.A., V.V. Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Yu.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (middle taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. No. 11. P. 1633–1646. doi: 10.1134/S1064229322110023

20. Listov A.A. Lichen pine forests. Moskva: Agropromizdat, 1986. 181 p. (in Russian).

21. Babintseva R.M. Dynamics of living ground cover on clearcuts of cedar stands in the northern part of the Western Sayan // Renewal in Siberian forests. Krasnoyarsk: Krasnoyarskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1965. 283 p. (in Russian).

22. All-Union norms for forest taxation / Eds. V.V. Zagreev, V.I. Sukhikh, A.Z. Shvidenko, N.N. Gusev, A.G. Moshkalev. Moskva: Kolos, 1992. 495 p. (in Russian).

23. Cools N., de Vos B. Sampling and Analysis of Soil // Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part 10. Hamburg: UNECE, ICP Forests, 2010. 208 p.

24. Alekseev V.A. Diagnostics of life state of trees and stands // Lesovedenie. 1989. No. 4. P. 51–57 (in Russian).

25. Alekseev A.S. Monitoring of forest ecosystems. Sankt-Peterburg: LTA, 1997. 114 p. (in Russian).

26. Tsvetkov P.A., Kirisheva D.A. Influence of recreation on natural regeneration of common pine // Hvoynye borealnye zony. 2004. No. 2. P. 61–65 (in Russian).

27. Gusev I.I. Modeling of ecosystems. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University, 2002. 112 p. (in Russian).

28. Atlas of soils of the Komi Republic / Eds. G.V. Dobrovolsky, A.I. Taskaev, I.V. Zaboieva. Syktyvkar: Komi Republican Printing House LLC, 2010. 356 p. (in Russian).

29. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // Eurasian Soil Science. 2024. V. 57. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064.

30. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties of upper mineral horizons of cutting area (middle taiga, Komi Republic) // Lomonosov Soil Science Journal. 2024. V. 79. No. 2. P. 15–25 (in Russian). doi: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-15-25

31. Pretzsch H., Schütze G. Effect of tree species mixing on the size structure, density, and yield of forest stands // Eur. J. Forest Res. 2016. V. 135. No. 1. P. 1–22. doi: 10.1007/s10342-015-0913-z

32. Malinovskikh A.A., Malenko A.A. Living soil cover influence on natural regeneration of Scots pine after felling in mature and over-mature stands in belt pine forests of the Altai Region // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. No. 12. P. 58–64 (in Russian).

Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on soil oligochaetes *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972)

© 2024. D. I. Stom^{1, 2, 3} ORCID: 0000-0001-9496-2961, M. M. Dolgikh^{1, 2} ORCID: 0009-0004-3563-9493,
I. N. Titov⁴ ORCID: 0009-0006-4557-9329, G. V. Dambaeva¹ ORCID: 0009-0009-4593-0299,
G. O. Zhdanova¹ ORCID: 0000-0002-8355-9517, A. D. Stom¹ ORCID: 0000-0002-7579-4971,
K.-K. K.-K. Boguspaev⁵ ORCID: 0000-0001-7747-6603,
S. L. Maksimova⁶ ORCID: 0000-0002-3118-1321, A. B. Kupchinsky² ORCID: 0000-0001-8884-8636

¹Irkutsk State University,

1, Karl Marks St., Irkutsk, Russia, 664003,

²Baikal Museum SB RAS,

1A, Akademicheskaya St., Listvyanka, Russia, 664520,

³Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontova St., Irkutsk, Russia, 664074,

⁴Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,

87, Gorky St., Vladimir, Russia, 600000,

⁵Al-Farabi Kazakh National University,

71, al-Farabi Ave, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050040,

⁶State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National
Academy of Sciences of Belarus for Bioresources",

27, Akademicheskaya St., Minsk, Republic of Belarus, 220072,

e-mail: stomd@mail.ru

Results of studying the main types of surfactants effect on earthworms *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972) are presented. The worms were tested for survival and preference-avoidance behavioral reactions. Earthworms avoided sodium dodecyl sulfate (SDS) at 0.02 g/kg and above, cetyltrimethylammonium bromide – at 0.1 g/kg and above, and polysorbate 80 – at 30 mL/kg and above. The 100% mortality of earthworms occurred at 0.001, 0.01 and 0.02 g/kg of SDS on day 30, at 1 g/kg – on day 25, and at 1 g/kg – on day 2 of the experiment. Cetyltrimethylammonium bromide at 0.001 and 0.01 g/kg caused the 100% mortality of worms on day 30; at 0.1 g/kg – on day 25; at 0.5 g/kg – on day 5; and at 1.0 g/kg already on day 2 of the experiment. The 100% mortality of worms occurred at 0.1, 1 and 10 mL/kg of polysorbate 80 on day 30 of incubation; at 20 or 30 mL/kg – on day 20; at 50 mL/kg – on day 10 of experience. The following toxicity series (both in terms of g/L and in terms of g/mol) of the tested surfactants for earthworms was constructed on the basis of the results obtained (increasing toxicity): polysorbate 80 (non-ionic surfactant) < cetrimonium bromide (cationic surfactant) < sodium dodecyl sulfate (anion-active surfactant).

Keywords: surfactants, soil pollution, sodium dodecyl sulfate, cetyltrimethylammonium bromide, polysorbate 80, toxicity tolerance, survival of earthworms, bioassay.

УДК 573.6

Влияние катионоактивного, анионоактивного и неионогенного поверхностно-активных веществ на почвенные олигохеты *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972)

© 2024. Д. И. Стом^{1, 2, 3}, д. б. н., зав. лабораторией водной токсикологии, профессор, г. н. с.,
М. М. Долгих^{1, 2}, аспирант, лаборант-исследователь,
И. Н. Титов⁴, к. б. н., доцент, Г. В. Дамбаева¹, магистрант,
Г. О. Жданова¹, н. с., А. Д. Стом¹, к. б. н., доцент,
К.-К. К.-К. Богуспаев⁵, д. б. н., доцент,
С. Л. Максимова⁶, к. б. н., зав. сектором вермифтехнологий,
А. Б. Купчинский², к. б. н., директор,

¹Иркутский государственный университет,
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1,

²Байкальский Музей СО РАН,
664520, Россия, Иркутская область, р. п. Листвянка, ул. Академическая, д. 1,

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83,

⁴Владимирский государственный университет,
600024, Россия, г. Владимир, пр. Строителей, д. 11,

⁵Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
050038, Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, д. 71, корп. 6,

⁶ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам»,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27,
e-mail: stomd@mail.ru

Изучено действие основных типов поверхностно-активных веществ (ПАВ) на дождевых червей *Eisenia fetida andrei* (Bouche, 1972). Тест-реакциями червей при этом служили выживаемость и поведенческая реакция предпочтения-избегания. Дождевые черви избегали додецилсульфат натрия при его содержании от 0,02 г/кг почвы, цетилтриметиламмония бромид – от 0,1 г/кг, твин-80 – от 30 мл/кг. Гибель 100% особей происходила при концентрации додецилсульфата натрия 0,001; 0,01 и 0,02 г/кг на 30-е сут, в присутствии 0,1 г/кг – на 25 сут, а при 1 г/кг – уже через 2 сут эксперимента. Цетилтриметиламмония бромид вызывал гибель всех червей на 30 сут опыта – при содержании 0,001 и 0,01 г/кг, на 25 сут – при внесении 0,1 г/л, на 5 сут – 0,5 г/кг, и уже на 2 сут опыта – при 1,0 г/кг. В присутствии 0,1; 1 и 10 мл/кг твина-80 отмирание 100% особей червей наступало на 30 сут инкубирования, при добавлении 20 и 30 мл/кг – на 20 сут, при 50 мл/кг ПАВ – на 10 сут опыта. Полученные результаты позволили выстроить следующий ряд токсичности (как в пересчёте на г/л, так и в пересчёте на г/моль) испытуемых ПАВ для дождевых червей (по возрастанию степени токсичности): твин-80 (неионогенный ПАВ) – цетилтриметиламмония бромид (катионоактивный ПАВ) – додецилсульфат натрия (анионоактивный ПАВ).

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, загрязнение почвы, додецилсульфат натрия, бромид цетилтриметиламмония, полисорбат 80, толерантность к токсичности, выживаемость дождевых червей, биотестирование.

Surfactants comprise a highly prevalent class of pollutants of various media. In particular, soils are subject to pollution with surfactants. Along with the infiltration of domestic wastewater through the soil, a significant amount of surfactants entering soil horizons is associated with their various applications in the oil industry [1–3]. In addition, surfactants are increasingly used in the reclamation of oil-contaminated media [4–10].

Once in the ground, surfactants can affect the soil flora, fauna and microbiota. In this connection, a fairly extensive body of research has been devoted to studying the effect of surfactants on microorganisms [11–17]. However, the effect of surfactants on soil worms is a less studied issue, as evidenced by the much smaller number of works [18–20]. At the same time, it is difficult to overestimate the role of these invertebrates in maintaining fertility to support normal life-sustaining activity and allow revegetation of polluted or disturbed soils.

In connection with the above, the purpose of the present work is to study the biological effects of representative anionic, cationic and non-ionic

surfactants on earthworms *Eisenia fetida andrei* (Bouche, 1972).

Materials and research methods

The object of research was the red Californian earthworm *Eisenia fetida andrei* (Bouche, 1972). The worms were bred in boxes in a laboratory at a temperature of ~ 20 °C and a humidity of 80–85%. The worms were fed by introducing vegetable waste (potatoes, carrots, cabbage). In the experiments we used sexually mature worms of the same age with a girdle zone (clitellum), 8–10 cm in length.

The studied surfactants are representatives of three main classes of surfactants: cationic – СТАВ (High Purity Grade, >99.0%); anionic – sodium dodecyl sulfate (puriss grade); non-ionic – polysorbate 80 (imp).

СТАВ is a cationic surfactant of the quaternary ammonium compounds class. It comprises the main component of the topical antiseptic cetrimide, an effective remedy against bacteria and fungi.

Sodium dodecyl sulfate (sodium lauryl sulfate) is a sodium salt of lauryl sulfuric acid.

This anion-active surfactant is widely used as a strong detergent in industry, pharmacology, and cosmetology.

Polysorbate 80 (Tween-80) is a polyoxyethylene (POE) derived from sorbitan and oleic acid. This non-ionic surfactant is an emulsifier and solubilizer of fats. It is used in the cosmetics and food industries, as well as in remediation of oil-contaminated soils, etc.

In our experiments contamination of the test substrates (soil, sand) was conducted by applying liquid surfactants and thoroughly mixing them in a Waring 800G laboratory blender (Conair Corporation, USA).

To assess the survivability of earthworms 10 individuals were placed in containers with 50 g of a test sample of river sand contaminated with surfactants. The sand was calcined and thoroughly washed with distilled water prior to the experiments. The sand without added pollutants was the control. The worms were exposed in the experiment for 30 days in the same conditions as their cultivation. During this time the number of surviving individuals of *E. fetida andrei* was periodically calculated.

In parallel the toxic effect of the tested compounds was evaluated by the behavioural reaction of preference-avoidance of the substrate by *E. fetida* earthworms [21]. Rectangular polyethylene containers (10.8 × 8.2 × 4.6 cm) were divided into 2 compartments using a plastic partition (Fig. 1). The height of the latter was 1.5–2 times lower than the height of the container sides. These compartments were filled with equal volumes of test samples of substrates: 1 – control (moistened up to 80% sand); 2 – experiment (moistened up to 80% sand contaminated with surfactants).

10 individual *E. fetida andrei* were placed in each of the compartments.

After 4 hours from the start of the experiment, the number of worm individuals in each of the compartments was counted. The biological effect of the test sample on the earthworm behavioural reaction was calculated using the formula:

$$T = \frac{K_0 - K_i}{K_0} \cdot 100\%$$

where T – biological effect (%); K_0 – initial number of worms placed in one compartment (10 individuals) at the beginning of the experiment; K_i – the number of worms observed in the experimental compartment at the time of taking down the results of the experiment.

The parameter calculated by such formula can reflect both preference (negative T value) and avoidance (positive T value) reactions of the *E. fetida* specimens.

The experiments were carried out in at least 5 independent experiments, with three repetitions in each. Statistical data processing was carried out using the Microsoft Office software package. The conclusions are made with the probability of an error-free forecast $P \geq 0.95$.

Results and discussion

Studying the CTAB effect on earthworms.

At 0.001 g/kg CTAB stimulated the studied behavioural response of oligochaetes. A sand sample contaminated with CTAB of 0.001 g/kg attracted $50 \pm 8\%$ more worms than the control sample (sand without added pollutants). CTAB at a concentration of 0.01 g/kg did not cause significant changes in *E. fetida* test reaction in comparison with the control. However, an increase in

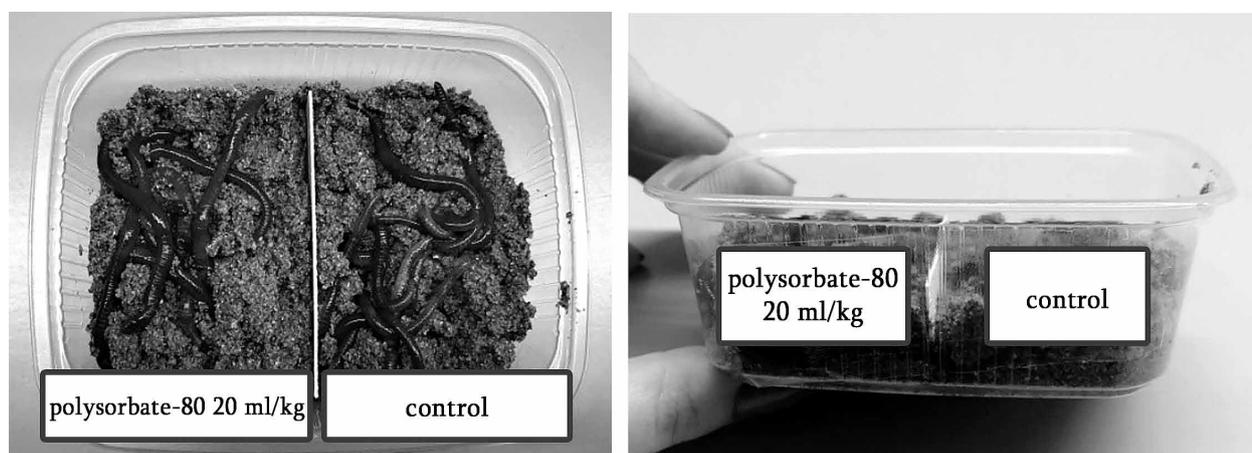


Fig. 1. Setup of experiment to evaluate the effects of tested sand samples contaminated with test toxicants using a preference-avoidance reaction with worms *Eisenia fetida andrei* (Bouche, 1972)

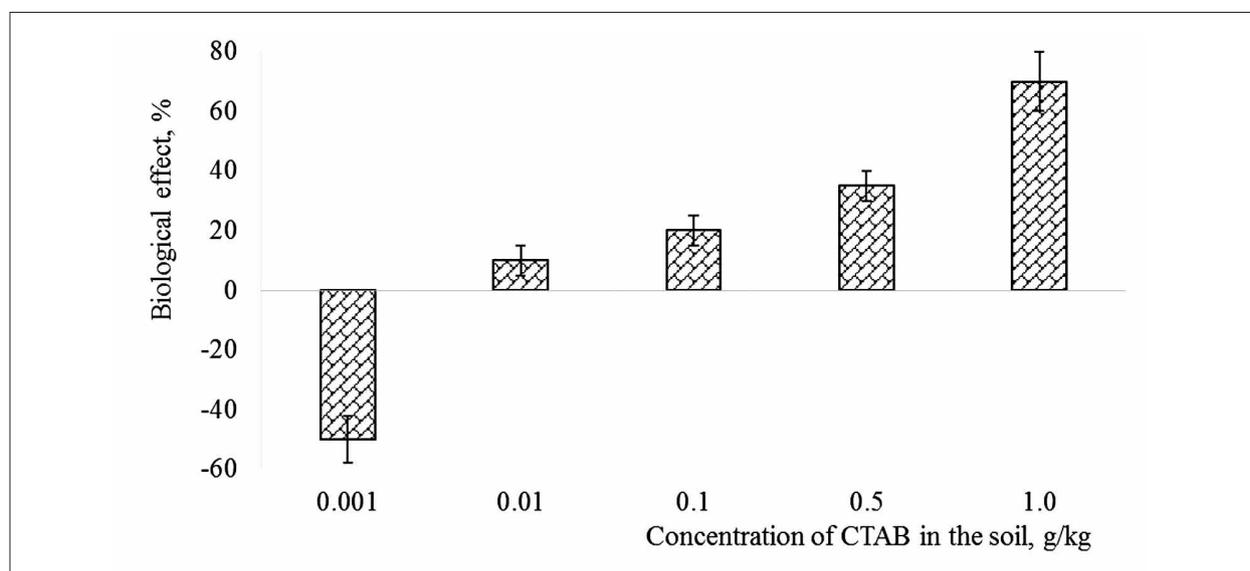


Fig. 2. The cationic surfactant CTAB effect on the preference-avoidance reaction of earthworms (experiment duration – 4 h)

Table 1

The CTAB cationic surfactant effect on the earthworms' viability

CTAB content, g/kg	Earthworms mortality, % of baseline							
	Day 1	Day 2	Day 5	Day 10	Day 15	Day 20	Day 25	Day 30
Control	0	0	0	0	0	0	0	0
0.001	0	0	0	0	0	0	15±5	100
0.01	0	0	0	0	0	0	55±8	100
0.1	0	0	0	0	0	15±5	100	100
0.5	0	0	100	100	100	100	100	100
1.0	0	100	100	100	100	100	100	100

the CTAB content in the substrate samples up to 0.1 g/kg induced a worm avoidance reaction. In this case, the *T* indicator was 20%. The increase in CTAB up to 0.5 g/kg increased *T* to 35±5%; when 1 g/kg of the test surfactant was added *T* was 70±10% (Fig. 2).

Incubation of earthworms for 30 days in STAB contaminated sand samples revealed the following. The complete death of worms in the presence of 0.001 and 0.01 g/kg of CTAB was observed on day 30 of the experiment. The proportion of dead individuals in these samples on day 25 was 15±5 and 55±8%, respectively. At application of 0.1 g/L all worm individuals died on day 25; at 0.5 g/kg – on day 5; at 1.0 g/kg – already on day 2 of the experiment (Table 1).

Studying the sodium dodecyl sulfate (SDS) effect on earthworms. The anion-active surfactant sodium dodecyl sulfate negatively affected the preference response of earthworms at 0.02 g/kg content. A sand sample with the above content of surfactant was avoided by 40±7% of worms. With a subsequent increase in the

SDS content the avoidance response increased. Thus, at a surfactant content of 0.03 g/kg worms avoidance of the sample was 50±10% of the total number of individuals taken in the experiment; at 0.04 g/kg – 60±8%; at 0.05 g/kg – 90±9 % of worms (Fig. 3).

Conversely, the lower SDS content – 0.0001 and 0.001 g/kg – attracted the earthworms. Thus, the samples with 0.0001 g/kg of SDS were preferred by 30±5%, and with 0.001 g/kg – 20±6% of the individuals taken in the experiment. The SDS addition of 0.01 g/kg did not affect the behavioural response of earthworms (Fig. 3).

In parallel, the SDS effect on the survivability of earthworms was evaluated. This surfactant caused 100% mortality of individuals at 0.001, 0.01 and 0.02 g/kg for 30 days; at 0.1 g/kg – for 25 days; at 1 g/kg – for 2 days of the experiment (Table 2).

Studying the polysorbate 80 effect on earthworms. The non-ionic surfactant polysorbate 80 also differently affects the behavioural

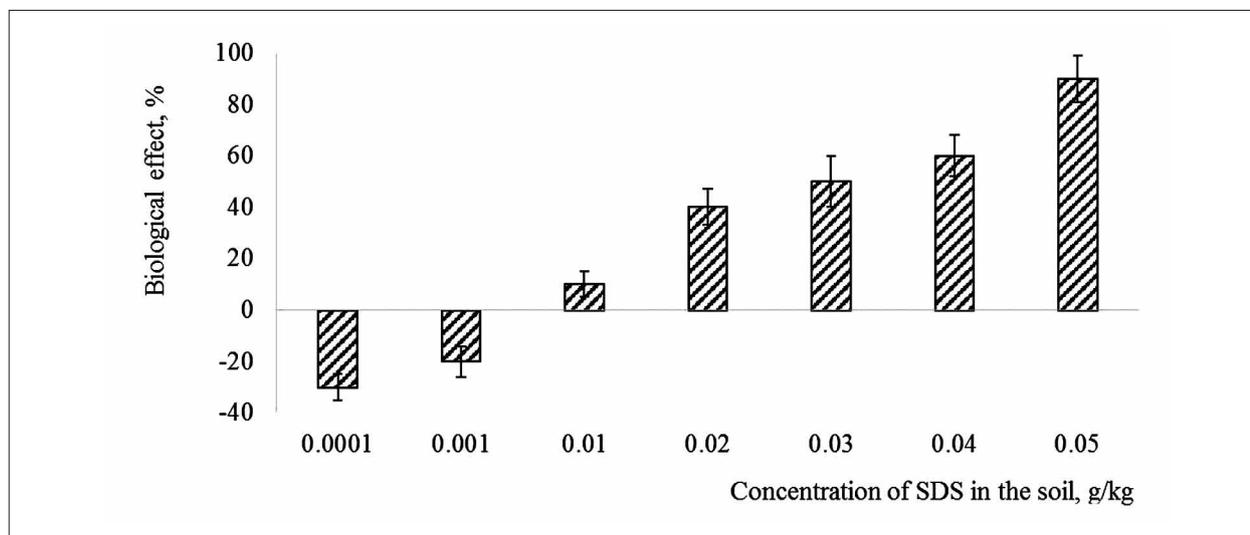


Fig. 3. The anion-active surfactant SDS effect on the preference-avoidance reaction of earthworms (experiment duration – 4 h)

Table 2

The SDS anion-active surfactant effect on the earthworms' viability

SDS content, g/kg	Earthworms mortality, % of baseline							
	Day 1	Day 2	Day 5	Day 10	Day 15	Day 20	Day 25	Day 30
Control	0	0	0	0	0	0	0	0
0.001	0	0	0	0	0	20	45±8	100
0.01	0	0	0	0	0	10	30	100
0.02	0	0	0	0	0	5	15±3	100
0.1	0	0	0	20	35±5	65±5	100	100
1	0	100	100	100	100	100	100	100

reaction of earthworms depending on the concentration. In concentration ranging from 0.1 to 10 mL/kg polysorbate 80 caused a preference reaction in worms, while 30 mL/kg and above led to an avoidance response to the tested substrates. For example, sand samples with 0.1, 1 and 10 mL/kg of polysorbate 80 preferred respectively 53±3, 27±9 and 13±6% more worms than control samples. The worms' behaviour was not significantly affected by polysorbate 80 in the substrate at 20 mL/kg. The number of individuals that chose this substrate was comparable to that in the control. 20±6, 43±3 and 65±5% of *E. fetida* individuals escaped from samples supplemented with 30, 40 and 50 mL/kg polysorbate 80, respectively (Fig. 4).

The 100% mortality of earthworms occurred on day 30 of incubation at 0.1; 1 and 10 mL/kg of polysorbate 80; with the addition of 20 and 30 mL/kg – on day 20, with 50 mL/kg of surfactant – on day 10 of experience (Table 3).

Thus, based on the concentrations at which the tested surfactants had a negative effect on earthworms, it can be concluded that the anion-

active SDS had a higher toxicity (in terms of both g/L and g/mol). It caused an avoidance reaction in earthworms at 0.02 g/kg content. The 100% mortality of individuals occurred when this surfactant was added at concentrations of 0.001, 0.01 and 0.02 g/kg on day 30; at 0.1 g/kg – on day 25; at 1 g/kg – on day 2 of the experiment.

The cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) turned out to be somewhat less toxic than sodium dodecyl sulfate (SDS). The CTAB negatively affects the behavioural reaction of oligochaetes at 0.1 g/kg. The 100% mortality of earthworms was observed at 0.001 and 0.01 g/kg on day 30 of experience; at 0.1 g/kg – on day 25; at 0.5 g/kg – on day 5; at 1.0 g/kg – already on day 2 of experience.

The non-ionic polysorbate 80 was the least aggressive of the three tested surfactants. Its effect on the behavioural reactions of earthworms depends on the concentration. Polysorbate 80 positively affected the studied behavioural reaction at a range from 0.1 to 10 mL/kg, and negatively affected – at 30 mL/kg and above.

The 100% mortality of worms occurred at 0.1, 1 and 10 mL/kg of polysorbate 80 on day 30 of incubation; at 20 or 30 mL/kg – on day 20; at 50 mL/kg – on day 10 of experience.

The resulting toxicity ratio of the surfactants (belonging to three different types) used in the work in relation to *E. fetida* turned out to be quite similar to that obtained by us and other authors earlier using other test organisms. For example, in studies to evaluate the effect of surfactants on the survival of *Paramecium caudatum* and *Daphnia magna* [22], as well as on changes in the intensity of bioluminescence of a cell culture of marine luminous bacteria *Photobacterium phosphoreum* and their enzyme system NAD(P)H:FMN oxidoreductase + luciferase (Red + Luc) [23]. The similar results were shown in the works [24, 25] to study the effect of surfactants on the release of electrolytes from cells of plants – *Beta vulgaris* L. and *Elodea canadensis*. Other authors also reported lower toxicity of non-ionic surfactants compared to ionic ones [26, 27].

T. Pescatore et al. [28] studied the effect of sodium laureth sulfate (SLES) on *E. fetida*. It was shown that 40% of worms were attracted to soil contaminated with SLES at a concentration of 4 mg/kg. At the highest surfactant concentration in soil tested by the authors (201 mg/kg), the avoidance reaction increased significantly (up to 67%). This suggests that earthworms will avoid such contaminated soil.

It was observed that Tween-80 additions to soil changed the fractional distribution of fluoranthene in soil and had a positive effect on fluoranthene removal and vermiaccumulation [19]. Some researchers have used worm survival rate as a test to evaluate the effect of detergents based on various surfactants [20, 29].

However, it should be noted that such works are quite small in number and are not comprehensive. In addition, a comparison of the toxicity of surfactants belonging to different classes towards *E. fetida* has not previously been carried out.

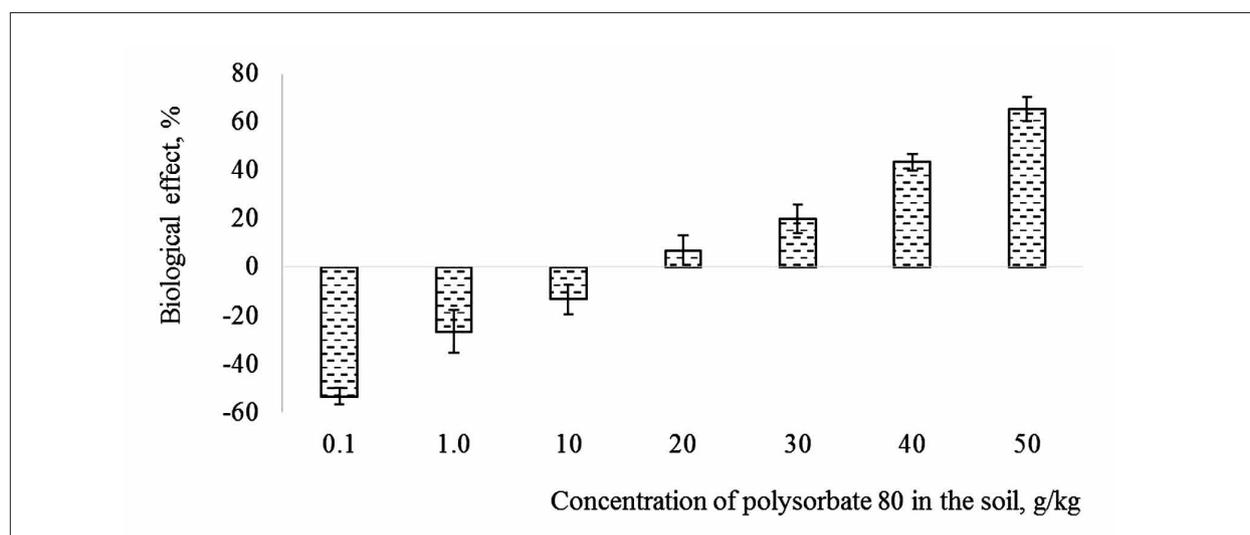


Fig. 4. The non-ionic polysorbate 80 surfactant effect on the preference-avoidance reaction of earthworms (experiment duration – 4 h)

Table 3

The non-ionic surfactant polysorbate 80 effect on the earthworms' viability

Polysorbate 80 content, mL/kg	Earthworms mortality, % of baseline							
	Day 1	Day 2	Day 5	Day 10	Day 15	Day 20	Day 25	Day 30
Control	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0	5±1	100
1	0	0	0	0	0	0	20±6	100
10	0	0	0	0	0	0	50	100
20	0	0	0	0	30	100	100	100
30	0	0	0	0	40	100	100	100
50	0	0	10±5	100	100	100	100	100

Conclusion

The following toxicity series of test surfactants in relation to survival and preference-avoidance behavioural reaction of *E. fetida* was constructed on the basis of the experimental results (increasing the degree of toxicity): polysorbate 80 (non-ionic surfactant) < CTAB (cationic surfactant) < SDS (anion-active surfactant).

The obtained data demonstrated that the preference-avoidance behavioural test reaction of *E. fetida* provides valid information about the toxicity of the tested surfactants at higher concentrations than in the assessment of worm survival. This is due to the difference in the contact time of the test organism with the toxicant (4 hours and 30 days, respectively). The sensitivity of acute biotests is always lower than in chronic experiments. However, despite the lower sensitivity of the behavioural response compared to survival, the significant advantage of the former is its rapidity. The possibility of obtaining a test response in a short time (4 hours) makes the preference-avoidance worms reaction promising for certain tasks of biological analysis, especially when conducting a preliminary assessment of contamination. In addition, the described test reaction makes it possible to detect not only the negative effect (toxicity) of the tested compounds, but also their stimulating effect (biological activity).

The work was conducted with the financial support of the RFBR grant 19-29-05213.

References

- Zulkifli N.N., Mahmood S.M., Akbari S., Manap A.A.A., Kechut N.I., Elrais K.A. Evaluation of new surfactants for enhanced oil recovery applications in high-temperature reservoirs // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2020. V. 10. P. 283–296. doi: 10.1007/s13202-019-0713-y
- Massarweh O., Abushaikh A.S. The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances // Energy Rep. 2020. V. 6. P. 3150–3178. doi: 10.1016/j.egy.2020.11.009
- Miller C., Bageri B.S., Zeng T., Patil S., Mohanty K.K. Modified two-phase titration methods to quantify surfactant concentrations in chemical-enhanced oil recovery applications // J. Surfactants Deterg. 2020. V. 23. P. 1159–1167. doi: 10.1002/jsde.12442
- Karthick A., Roy B., Chattopadhyay P. A review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil // J. Environ. Manage. 2019. V. 243. P. 187–205. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.092
- Liu J.W., Wei K.H., Xu S.W., Cui J., Ma J., Xiao X.L., Xi B.D., He X.S. Surfactant-enhanced remediation of oil-contaminated soil and groundwater: A review // Sci. Total Environ. 2021. V. 756. Article No. 144142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144142
- Bekadu A.A., Chen Q. Surfactant-enhanced soil washing for removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soils: A review // Pedosphere. 2018. V. 28. No. 3. P. 383–410. doi: 10.1016/S1002-0160(18)60027-X
- Rasheed T., Shafi S., Bilal M., Hussain T., Sher F., Rizwan K. Surfactants-based remediation as an effective approach for removal of environmental pollutants: A review // J. Mol. Liq. 2020. V. 318. Article No. 113960. doi: 10.1016/j.molliq.2020.113960
- Litvinets S.G., Martinson E.A., Kuznetsov S.M., Zadorina E.O., Novikova O.A., Komosko V.G., Nikolaeva A.V., Troshin M.A., Gaysin M.T. Comparative evaluation of the efficiency of solid and liquid dispersants in simulation of oil and oil product spills // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 115–123 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-115-123
- Meshalkin V.P., Kovalenko V.S., Shcherbakova G.A., Kolesnikov A.V. Flotation technologies for purification of filtration waters of solid waste landfills // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 20–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-020-027
- Kulikova O.A., Terekhova V.A., Mazlova E.A., Nishkevich Yu.A., Kydraliev K.A. Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludges) after their reagent treatment // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 120–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-120-126
- Bramwell D.P., Laha S. Effects of surfactant addition on the biomineralization and microbial toxicity of phenanthrene // Biodegradation. 2000. V. 11. No. 4. P. 263–277. doi: 10.1023/a:1011121603049
- Celik G.Y., Aslim B., Beyatli Y. Enhanced crude oil biodegradation and rhamnolipid production by *Pseudomonas stutzeri* strain G11 in the presence of Tween-80 and Triton X-100 // J. Environ. Biol. 2008. V. 29. No. 6. P. 867–870.
- Tian W., Yao J., Liu R.P., Zhu M.J., Wang F., Wu X., Liu H. Effect of natural and synthetic surfactants on crude oil biodegradation by indigenous strains // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 129. P. 171–179. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.03.027
- Xu R., Zhang Z., Wang L., Yin N., Zhan X. Surfactant-enhanced biodegradation of crude oil by mixed bacterial consortium in contaminated soil // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2018. V. 25. No. 15. P. 14437–14446. doi: 10.1007/s11356-018-1604-3
- Staninska-Pięta J., Piotrowska-Cyplik A., Juzwa W., Zgoła-Grześkowiak A., Wolko Ł., Sydow Z., Kaczorowski Ł., Powierska-Czarny J., Cyplik P. The impact of natural and synthetic surfactants on bacterial community during hydrocarbon biodegradation // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2019. V. 142. P. 191–199. doi: 10.1016/j.ibiod.2019.05.010

16. Gildebrant A.V., Domracheva L.I., Vyrostkov V.A., Sazykin I.S., Kudrevskaya E.M., Sazykina M.A. The influence of surface-active substances on biofilm formation by the *Acinetobacter calcoaceticus* VKPM B-10353 strain // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 52–57 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-052-057
17. Domracheva L.I., Simakova V.S. Reactions of pro- and eukaryotic microorganisms to the action of synthetic surfactants (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 5–17 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-005-017
18. Gong X., Li S., Chang S.X., Wu Q., Cai L., Sun X. Alkyl polyglycoside and earthworm (*Eisenia fetida*) enhance biodegradation of green waste and its use for growing vegetables // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2019. V. 167. P. 459–466. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.10.063
19. Shi Z., Wang C., Zhao Y. Effects of surfactants on the fractionation, vermi-accumulation, and removal of fluoranthene by earthworms in soil // Chemosphere. 2020. V. 250. Article No. 126332. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126332
20. Dakthika Dr.T., Anbumalar A. Determination of LC₅₀ values of three detergents and its effect on biochemical compounds of *Eisenia fetida* // Nat. Volatiles & Essent. Oils. 2021. V. 8. No. 5. P. 3708–3713.
21. Stom D.I., Gelman M.M., Antonova E.V., Lovozaya T.S., Stom A.D. Methodological approaches to assessing the toxicity of compounds by changing the behavioral response of soil oligochaetes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. V. 990. Article No. 012073. doi: 10.1088/1755-1315/990/1/012073
22. Evsyunina E.V., Taran D.O., Stom D.I., Saksonov M.N., Balayan A.E., Kirillova M.A., Esimbekova E.N., Kratasyuk V.A. Comparative assessment of toxic effects of surfactants using biotesting methods // Inland Water Biology. 2016. V. 9. No. 2. P. 196–199. doi: 10.1134/S1995082916020061
23. Sutormin O.S., Kolosova E.M., Torgashina I.G., Kratasyuk V.A., Kudryasheva N.S., Kinstler J.S., Stom D.I. Toxicity of different types of surfactants via cellular and enzymatic assay systems // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. Article No. 515. doi: 10.3390/ijms24010515
24. Krapivnaya M.V., Domracheva V.A., Stom D.I. Effect of surfactants (sodium dodecyl sulfate, cetyltrimethylammonium bromide) on cell membrane permeability of red beet roots *Beta vulgaris* L. // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2023. V. 13. No. 1. P. 50–56 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56
25. Donina K.Yu., Saksonov M.N., Kupchinsky A.B., Cherkasov D.V., Stom D.I. The effect of surfactants on the release of ions from the shoots of *Elodea canadensis* // AIP Conference Proceedings. 2023. V. 2817. Article No. 020045. doi: 10.1063/5.0148419
26. Li X.H., Li H., Chen C.Y., Li J.T., Liu F. Acute toxicity of different type pesticide surfactants to *Daphnia magna* // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao (J. Appl. Ecol.). 2013. V. 24. No. 8. P. 2319–2324 (in Chinese).
27. Ikeda K., Kochi M., Tochitani T., Umeya N., Matsumoto I., Fujii Y., Usui T., Miyawaki I. Investigation of solvents that can be used as vehicles to evaluate poorly soluble compounds in short-term oral toxicity studies in rats // Fundam. Toxicol. Sci. 2024. V. 11. No. 2. P. 69–78. doi: 10.2131/fts.11.69
28. Pescatore T., Di Nica V., Finizio A., Ademollo N., Spataro F., Rauseo J., Patrolecco L. Sub-lethal effects of soil multiple contamination on the avoidance behaviour of *Eisenia fetida* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021. V. 226. Article No. 112861. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112861
29. Amala Thomas, Rakhi T.V., Sunish K.S. A study on the effect of detergent on *Megascolex konkanensis* // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2019. V. 8. No. 8. P. 9020–9028. doi: 10.15680/IJIRSET.2019.0808015

Лиофилизированные микроорганизмы как основа биочувствительного элемента БПК-биосенсора

© 2024. Н. Ю. Юдина¹, к. х. н., с. н. с., Т. Н. Козлова¹, м. н. с.,
М. Г. Зайцев¹, к. х. н., доцент, В. А. Самойленко², к. б. н., с. н. с.,
С. В. Алфёров¹, к. х. н., зав. лабораторией,

¹Тульский государственный университет,
300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, д. 92,

²Институт биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г. К. Скрыбина РАН –
обособленное подразделение ФИЦ «Пушчинский научный центр биологических
исследований РАН»,
142290, Россия, г. Пушино, пр. Науки, д. 5,
e-mail: tysia21-05-90@mail.ru

Разработаны и апробированы биосенсоры для определения биохимического потребления кислорода (БПК) на основе лиофилизированных бактерий *Paracoccus yeei* ВКМ В-3302 и дрожжей *Debaryomyces hansenii* ВКМ У-2482. Использование лиофилизированной формы микроорганизмов позволяет перейти на новый формат анализа – применение легкозаменяемых биочувствительных элементов с коротким сроком эксплуатации, что облегчит внедрение БПК-биосенсоров в лаборатории экологического мониторинга, занимающиеся рутинным определением БПК по методике, основанной на 5-ти суточной инкубации проб. Биосенсоры характеризуются высокой чувствительностью (нижняя граница определения БПК₅ 0,5 мгО₂/дм³), сходимостью результатов (4,5%), позволяют анализировать пробы воды, отнесённые к категории «чистые» (диапазон БПК₅ 0,05–0,5 мг/дм³), и получать результаты с высокой корреляцией (R=0,9951) к стандартному методу.

Ключевые слова: биосенсор, биохимическое потребление кислорода (БПК), лиофилизированные микроорганизмы, *Paracoccus yeei*, *Debaryomyces hansenii*.

Lyophilized microorganisms as a basis for biosensitive element of a BOD-biosensor

© 2024. N. Yu. Yudina¹ ORCID: 0000-0002-4054-9642, T. N. Kozlova¹ ORCID: 0000-0002-6928-0392,
M. G. Zaytsev¹ ORCID: 0009-0000-9686-5487, V. A. Samoilenko² ORCID: 0009-0006-9895-1200,
S. V. Alferov¹ ORCID: 0000-0002-5217-7815³

¹Tula State University,

92, Pr. Lenina, Tula, Russia, 300012,

²G. K. Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms,
Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center,

5, Pr. Nauki, Pushchino, Russia, 142290,

e-mail: tysia21-05-90@mail.ru

Previously created laboratory models and commercially available BOD biosensors are usually formed using the biomass of microorganisms obtained by centrifugation of the culture fluid. In this work we developed and tested BOD biosensors based on lyophilized bacteria *Paracoccus yeei* VKM V-3302 and yeast *Debaryomyces hansenii* VKM Y-2482. The use of a lyophilized form of microorganisms makes it possible to switch to a new analysis format – the use of easily replaceable biosensitive elements with a short service life. It will simplify the introduction of BOD biosensors in environmental laboratories, enterprises and organizations involved in the routine determination of BOD using a methodology based on a 5-day sample incubation. The long shelf life (up to 2 years), low cost and easy applying of a dry preparation to the electrode will greatly facilitate the transportation of biosensitive elements to the end user, allow analysis in the field and at any time and will not require constant calibration of a sensor. It has been shown that the lyophilization process does not lead to significant changes in the metabolic activity of microorganisms. The biosensors are characterized by high sensitivity (the lower limit of BOD₅ determination is 0.5 mgO₂/дм³), convergence of results (4.5%) and are not inferior

to existing analogs in terms of basic characteristics. They make it possible to analyze water samples classified as “pure” (BOD_5 range 0.05–0.5 mg/dm³) and obtain results with a high correlation ($R=0.9951$) to the standard method. Thus, the use of bacteria *P. yeii* and yeast *D. hansenii* in a lyophilized form as part of the sensitive elements of BOD biosensors makes it possible to use them in prototypes of biosensors for mass production.

Keywords: biosensor, biochemical oxygen demand, lyophilized microorganisms, *Paracoccus yeii*, *Debaryomyces hansenii*.

Одним из важнейших параметров, характеризующих степень загрязнённости сточных вод легкоокисляемыми органическими соединениями, является биохимическое потребление кислорода (БПК). С целью сокращения времени измерения БПК разработаны экспресс-биосенсоры для оценки степени загрязнения воды. Принцип анализа заключается в том, что микроорганизмы, иммобилизованные на физико-химическом преобразователе, окисляют органические вещества, генерируя аналитический сигнал, регистрируемый преобразователем. Для экспресс-определения БПК используют микробные биосенсоры, основанные на применении целых клеток бактерий (*Escherichia coli*, *Serratia marcescens*, *Bacillus polymyxa*, *Bacillus subtilis*, *Klebsiella*) и дрожжей (*Torulopsis candida*, *Arxula adenivorans*, *Hansenula anomala*, *Saccharomyces cerevisiae* и др.) [1]. Особо следует выделить дрожжи *Debaryomyces hansenii* [2] и бактерии *Paracoccus yeii* [3], способные окислять широкий спектр органических веществ и обладающие высокой устойчивостью к стрессовым факторам окружающей среды.

БПК-биосенсоры позволяют достигнуть высокой корреляции данных со стандартным методом определения БПК (не менее $R=0,9800$), однако большинство из них находятся на стадии научно-исследовательских разработок, что находит отражение в обзорных статьях [1, 4–6]. В целом за последние 5 лет в базе данных ScienceDirect опубликовано более 700 работ с ключевым словом «БПК-биосенсор».

Существующие коммерческие БПК-биосенсоры по конструкции представляют собой массивные биореакторные установки (до 200 кг), что затрудняет их повсеместное распространение в лабораториях и делает невозможным проведение анализа в полевых условиях. Поэтому создание компактного, автономного быстродействующего биосенсора является актуальной задачей. Большое внимание уделяется разработке медиаторных биосенсоров и микробных биотопливных элементов [4], однако их массовое производство и повсеместное распространение затруднено из-за сложного аппаратного оформления

и необходимости внесения дополнительных реагентов.

Все описанные ранее БПК-биосенсоры обладают низкой сходимостью, поскольку биочувствительные элементы в них сформированы с использованием «влажной» биомассы (живые клетки микроорганизмов, выращенные на жидкой питательной среде и отделённые от неё путём центрифугирования). Кроме конструктивных особенностей для конечного потребителя важное значение имеют, во-первых, простота закрепления биоматериала на электроде, а во-вторых, стабильность работы биочувствительного элемента БПК-биосенсора. Для решения первой проблемы разработано значительное количество биочувствительных элементов на основе микроорганизмов, иммобилизованных в различные матрицы [2, 3, 7, 8], но их существенными недостатками являются ограниченный срок хранения иммобилизованных микроорганизмов, постоянное изменение их активности в рецепторном элементе сенсора и, как следствие, сложность проведения стандартизации. В связи с этим перспективным направлением является создание БПК-биосенсоров на основе лиофилизированных микроорганизмов, которые способны сохранять жизнеспособность на высоком уровне до двух лет, что создаёт предпосылки к переходу на другой формат анализа. Так, использование лиофилизированной формы микроорганизмов позволит создавать легкозаменяемые (даже в полевых условиях) биочувствительные элементы с коротким сроком эксплуатации, а БПК-биосенсоры на их основе будут обладать высокой сходимостью результатов благодаря повышению устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды [9]. Лيوфилизированные микроорганизмы уже используются для создания различных биосенсорных систем, например, биосенсоров на основе люминесцентных бактерий [10–12] и микробных топливных элементов для определения токсичности [13]. Совместно с научно-производственной фирмой ООО «Эконикс-Эксперт» разработан коммерчески доступный экспресс-анализатор биохимического потребления кислорода «Эксперт-009» на основе кислородного электрода

и аттестована методика экспресс-оценки БПК с использованием биологического сенсора (МУ 09-16/001).

В связи с этим целью работы является создание БПК-биосенсора на основе лиофилизированных бактерий *Paracoccus yeei* и дрожжей *Debaryomyces hansenii*.

Объекты и методы исследования

Культивирование микробных клеток.

Штаммы бактерий *Paracoccus yeei* ВКМ В-3302 и дрожжей *Debaryomyces hansenii* ВКМ У-2482 были получены из Всероссийской коллекции микроорганизмов Института биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г. К. Скрыбина РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия).

Для получения инокулята бактерий *P. yeei* В-3302 пересеивали в пробирки на скошенный мясо-пептонный агар (аминопептид – 5 г/дм³, триптон – 5 г/дм³, дрожжевой экстракт – 1 г/дм³, соевый экстракт – 5 г/дм³, агар-агар – 20 г/дм³) и культивировали в течение 24 ч. Полученную биомассу стерильно переносили в жидкую мясо-пептонную среду и культивировали 24 ч при температуре 28 °С.

Культивирование проводили в ферментере АНКУМ-2М (Россия) объёмом 10 л с заполнением на 60% средой следующего состава: печёночный экстракт (Himedia, India) – 10 г/дм³, дрожжевой пептон (Angel Yeasts, China) – 10 г/дм³, дрожжевой экстракт («Диа-М») – 5 г/дм³, сульфат магния – 0,2 г/дм³, сульфат марганца – 0,1 г/дм³, гидрофосфат калия – 0,5 г/дм³, дигидрофосфат калия – 1 г/дм³, пеногаситель Софэксил-1520 («Софэкс-Силикон», Россия) – 2 г/дм³, вода – до 6 л. Питательную среду стерилизовали автоклавированием при 120 °С и давлении 1,1 атм в течение 40 мин и далее стерильно подавали в ферментёр. Режим культивирования: 28 °С, 350 об./мин, рН 5,0. Полученную биомассу отделяли от супернатанта центрифугированием в течение 10 мин при 10000 г при комнатной температуре.

Инокулят дрожжевых клеток *D. hansenii* получали пересеиванием в пробирки со скошенным сусло-агаром (солодовый экстракт – 15,0 г/дм³, пептон – 0,75 г/дм³, мальтоза – 12,75 г/дм³, декстрин – 2,75 г/дм³, глицерин – 2,35 г/дм³, гидрофосфат калия – 0,4 г/дм³, хлорид аммония – 1,0 г/дм³, агар-агар – 20 г/дм³). Далее полученную биомассу стерильно пере-

носили в жидкую среду того же состава и культивировали при 28 °С в течение 48 ч.

Культивирование проводили в ферментёре АНКУМ-2М на среде следующего состава: дрожжевой пептон (Angel Yeasts, China) – 8 г/дм³, дрожжевой экстракт («Диа-М») – 5 г/дм³, глюкоза – 10 г/дм³, сульфат аммония – 3 г/дм³, сульфат магния – 0,3 г/дм³, дигидрофосфат калия – 1 г/дм³, пеногаситель Софэксил-1520 («Софэкс-Силикон», Россия) – 2 г/дм³, вода до 6 л.

Стадии получения лиофилизированных микроорганизмов. После концентрирования клеточную биомассу смешивали с защитной средой в соотношении 1:1. Для бактерий *P. yeei* в качестве защитной среды использовали раствор, содержащий 1% сухого молока («Диа-М»), 1% трегалозы («Диа-М») и 2% глутамата («Диа-М»). Для дрожжей *D. hansenii* раствор трегалозы был заменён на сахарозу. Концентрированную суспензию с защитной средой замораживали в кюветах при -40 °С. Лиофильную сушку проводили на установке КС-30 (компания «ЖАР-КО», г. Санкт-Петербург), сушку вели при начальной температуре (50–55) °С и давлении 1,25 Па. Через 2,5–3 ч включали нагрев полков до 35 °С. Продолжительность процесса сушки 19–20 ч. Сухую биомассу хранили при -20 °С в герметичной упаковке (рис. 1, см. цв. вкладку V).

Определение жизнеспособности лиофилизированных микробных клеток. Количество жизнеспособных бактерий *P. yeei* и дрожжей *D. hansenii* в 1 грамме лиофилизированного препарата определяли методом стандартных серийных разведений гомогенной суспензии микроорганизмов на чашки Петри с богатой питательной средой Лурия-Бертани. Высев проводился в трёх повторностях через 6, 12, 18 и 24 месяца хранения лиофилизированного препарата при -20 °С в герметичной упаковке.

Перед высевом высушенные образцы микроорганизмов регидратировали и гомогенизировали фосфатно-буферным (рН 6,8, концентрация солей 33 мМ) физиологическим (0,9% NaCl) раствором и инкубировали при 25 °С.

Формирование чувствительного элемента биосенсора. Лиофилизированные клетки фиксировали на поверхности кислородного электрода с помощью диализной мембраны Z742631 (4 кДа, Sigma-Aldrich, США) и резинового кольца. Массу лиофилизированных бактерий в биочувствительном элементе

Н. Ю. Юдина, Т. Н. Козлова, М. Г. Зайцев,
В. А. Самойленко, С. В. Алфёров
«Лиофилизированные микроорганизмы как основа
биочувствительного элемента БПК-биосенсора». С. 141.

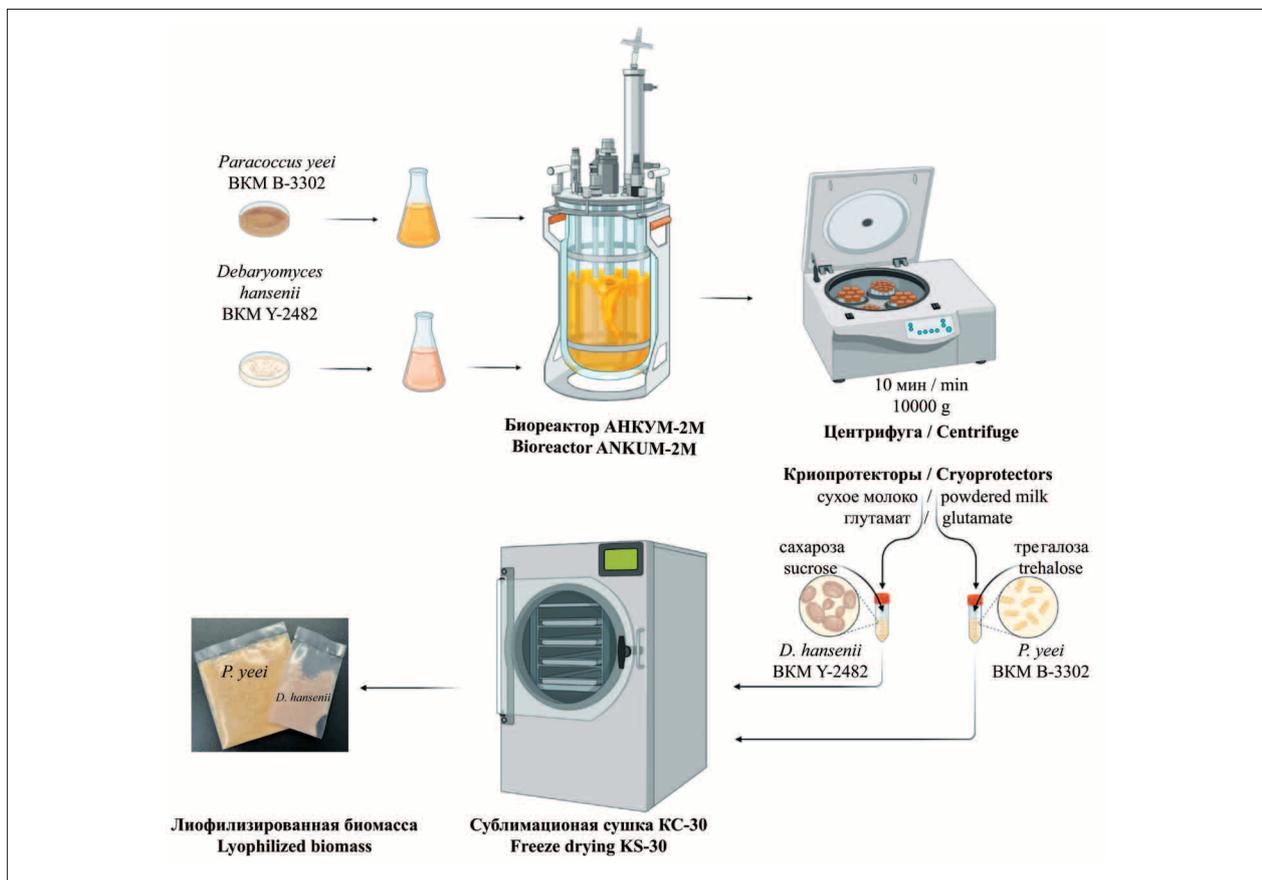


Рис. 1. Стадии получения лиофилизированных микроорганизмов
Fig. 1. Stages of obtaining lyophilized microorganisms

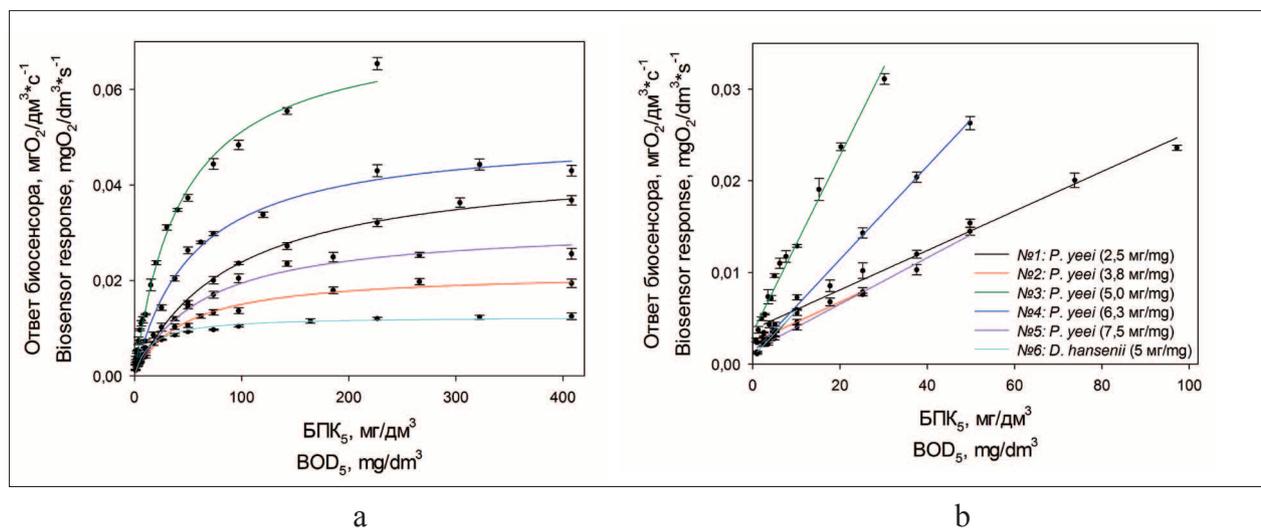


Рис. 6. Зависимость ответов ($\text{mg O}_2/\text{dm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$) разработанных биосенсоров от БПК₅:
а) гиперболические; б) линейные участки
Fig. 6. Dependence of responses ($\text{mg O}_2/\text{dm}^3 \cdot \text{c}^{-1}$) of developed biosensors on BOD₅:
а) hyperbolic dependences; б) linear segments

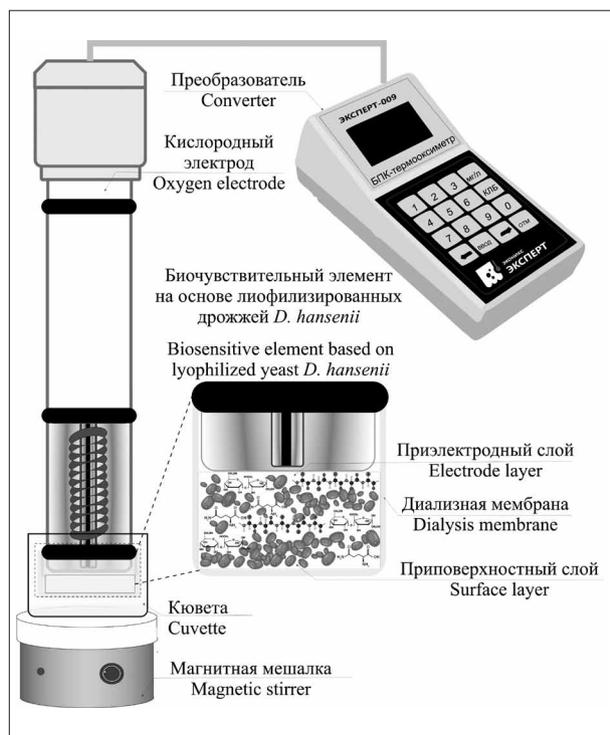


Рис. 2. Макет БПК-биосенсора на основе БПК-термооксиметра-ЭКСПЕРТ-009 и кислородного электрода типа Кларка
Fig. 2. Model of a BOD biosensor based on an EKSPERT-009/BOD thermo-oximeter and Clark oxygen electrode

варьировали от 2,5 до 7,5 мг (титр бактерий *P. yeii* $(14 \pm 1) \cdot 10^9$ КОЕ/г сухого препарата). Дрожжи *D. hansenii* наносили в количестве 5 мг (титр $(20 \pm 1) \cdot 10^4$ КОЕ/г сухого препарата).

Для активации лиофилизированного биоматериала электрод помещали на несколько часов в кювету с натрий-калиевым фосфатным буферным раствором (рН 6,8, концентрация солей 33 мМ) и периодически добавляли окисляемый субстрат.

Биосенсорные измерения. Измерения выполняли с помощью «БПК-термооксиметра-Эксперт-009» (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия), подключенного к персональному компьютеру в режиме «термооксиметр», в программе EXP2PR (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия). В качестве преобразователя использовали кислородный электрод типа Кларка, на котором были иммобилизованы микробные клетки (рис. 2). За ответ биосенсора принимали максимальную скорость изменения концентрации кислорода от времени ($\text{мгO}_2/\text{дм}^3 \cdot \text{с}^{-1}$). Измерения проводили в кювете объёмом 5 см³ при постоянном перемешивании на магнитной мешалке (250 об./мин). Для измерений использовали натрий-калиевый фосфатный буферный рас-

твор (рН 6,8). Аликвоты проб вводили автоматическими микропипетками переменного объёма (500–5000 мкл, 100–1000 мкл, 30–300 мкл, 10–100 мкл, 2–20 мкл, Thermo Fisher Scientific, США).

В качестве раствора для калибровки БПК-биосенсоров использовали смесь глюкозы и глутаминовой кислоты (ГГС) с концентрацией 150 мг/дм³ каждого компонента (суммарно 300 мг/дм³, что соответствует БПК₅ 205 мг/дм³ согласно методикам ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97 и ISO 5815-1:2019).

Статистическая обработка экспериментальных данных. Была проведена с использованием пакета программ Microsoft Office. Все эксперименты проводили не менее чем в 5 независимых опытах с 3 параллельными измерениями в каждом. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $P \geq 0,95$. Достоверность различия результатов определена с помощью критерия Стьюдента.

Определение БПК₅ стандартным методом разбавления. Отбор проб производился в соответствии со стандартной методикой (ГОСТ 31861-2012).

В качестве референтного метода для определения БПК₅ был использован метод разбавления в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97. Определение содержания растворённого кислорода в исследуемых пробах выполняли амперометрическим методом.

Результаты и обсуждение

Формирование биочувствительных элементов БПК-биосенсоров на основе лиофилизированных микроорганизмов. В работах [2, 14] показано применение дрожжей *D. hansenii* и бактерий *P. yeii* в «сыром» виде для создания чувствительных элементов БПК-биосенсоров, характеризующихся высокой стабильностью. Поэтому были получены лиофилизированные препараты этих микроорганизмов. Для быстрой оценки окислительной активности клеток иммобилизацию лиофилизированных микроорганизмов проводили с использованием химически инертной диализной мембраны [15].

Исследование жизнеспособности лиофилизированных микроорганизмов. Для получения стабильных лиофилизатов решающее значение имеет выбор вспомогательных веществ наряду с оптимизацией параметров процесса [16]. Для успешной лиофилизации бактерии *P. yeii* и дрожжи *D. hansenii* смешивались с криопротекторами поликомпонентного состава, как описано выше. Выбранная

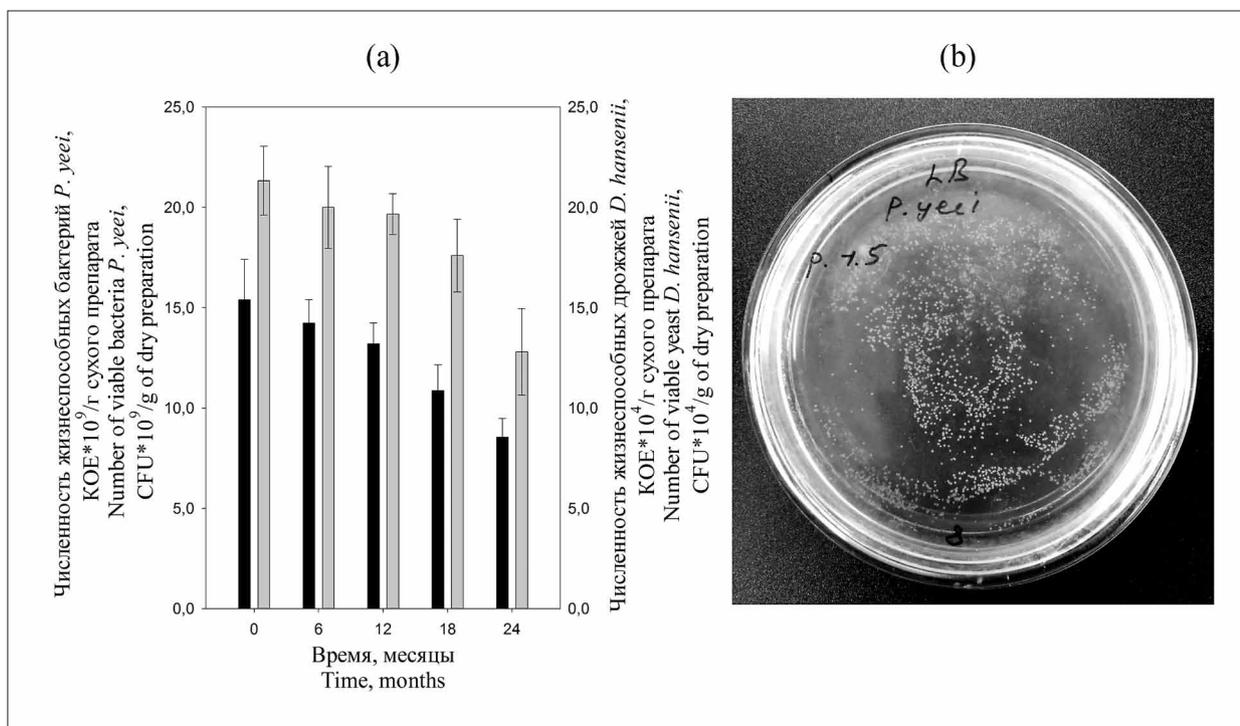


Рис. 3. Жизнеспособность лиофилизированных микроорганизмов в процессе хранения: (a) гистограммы выживаемости бактерий *P. yeii* и дрожжей *D. hanseni*; (b) высеv бактерий *P. yeii* из лиофилизированного препарата

Fig. 3. Viability of lyophilized microorganisms during storage: (a) survival histograms of *P. yeii* bacteria and *D. hanseni* yeast; (b) inoculation of *P. yeii* bacteria from the lyophilized preparation

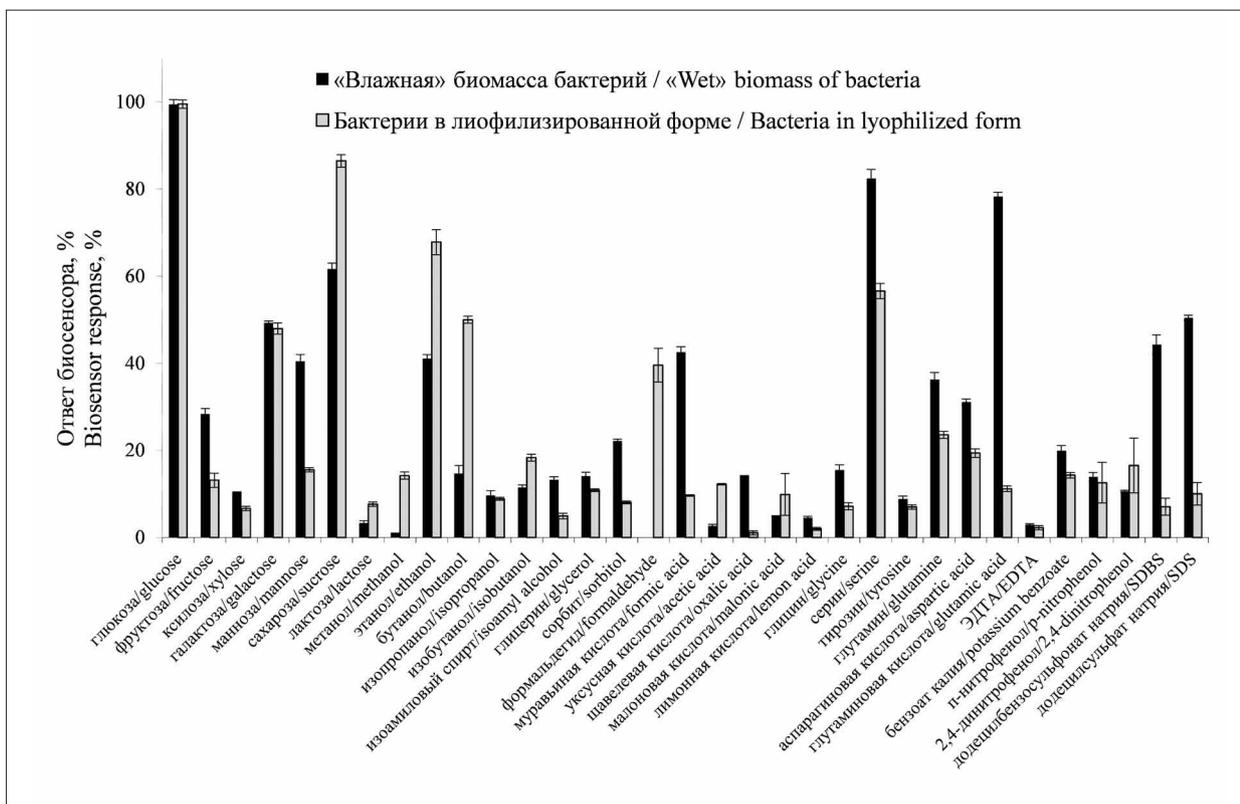


Рис. 4. Сравнение спектров окисляемых веществ бактериями *P. yeii* во «влажной» и лиофилизированной формах
Fig. 4. Comparison of the spectrums of oxidizable substances by *P. yeii* bacteria in “wet” and lyophilized forms

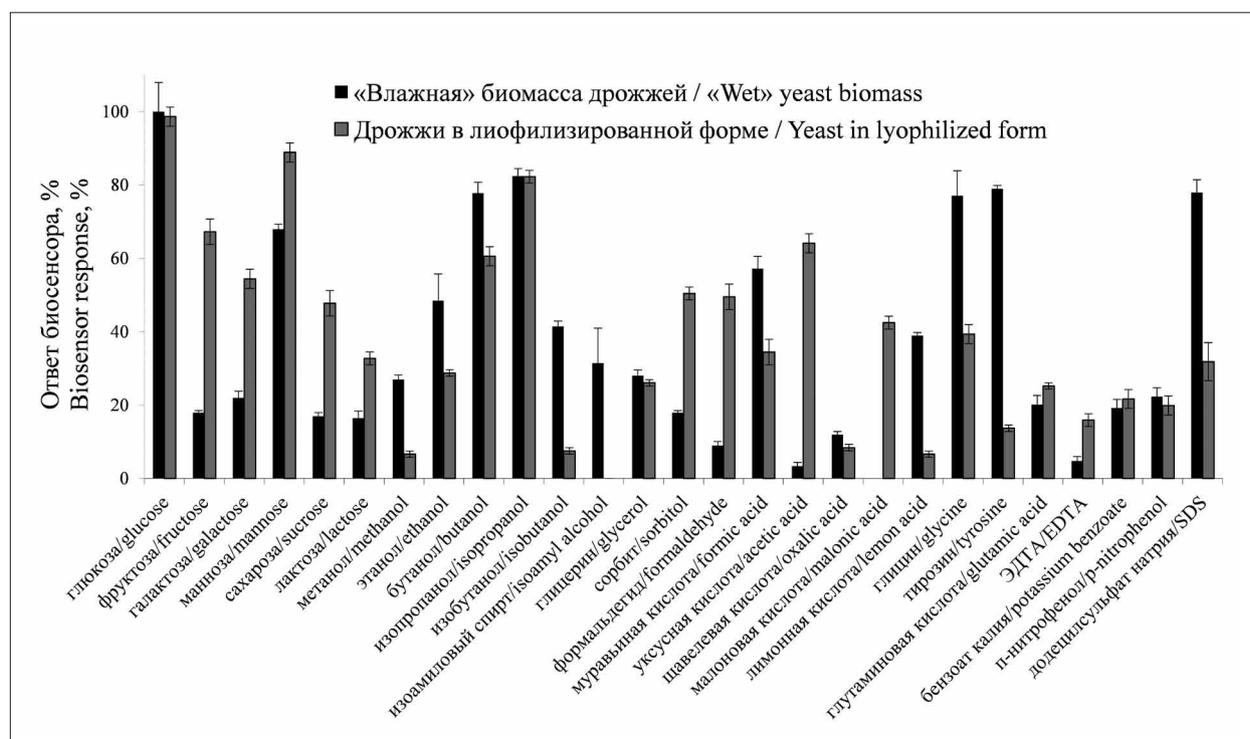


Рис. 5. Сравнение спектров окисляемых веществ дрожжами *D. hansenii* во «влажной» и лиофилизированной формах
 Fig. 5. Comparison of the spectrums of oxidizable substances by *D. hansenii* yeast in “wet” and lyophilized forms

комбинация соединений, характеризующихся своим механизмом защитного действия, имеет ряд преимуществ. Сахара, как защитные агенты, могут быть использованы микроорганизмами после регидратации в качестве источника энергии [17]. В присутствии дисахаридов увеличивается вязкость сконцентрированных замораживанием внеклеточных растворов, что способствует снижению подвижности молекул воды и приводит к обезвоживанию клеток, предотвращая, таким образом, образование внутриклеточного льда, нарушающего целостность мембран [18]. Белок, содержащийся в сухом молоке, приобретает аморфную стеклообразную структуру, обеспечивающую высокую стабильность микроорганизмов в дегидратированном состоянии после лиофильной сушки [19, 20]. Применение глутамата в качестве компонента защитной среды объясняется его способностью взаимодействовать с липидным бислоем клеточной мембраны, что увеличивает текучесть мембраны и, в свою очередь, толерантность микроорганизмов к сублимационной сушке [21].

При использовании выбранной комбинации криопротекторов начальный титр бактерий *P. yeii* в 1 г сухого препарата составил $(15 \pm 1) \cdot 10^9$ КОЕ, а для дрожжей *D. hansenii* – $(21 \pm 1) \cdot 10^4$ КОЕ. Для оценки жизнеспособ-

ности лиофилизированных микроорганизмов при хранении в работе была исследована выживаемость бактериальных и дрожжевых клеток через 6, 12, 18 и 24 месяца (рис. 3).

Выживаемость обоих микроорганизмов остаётся высокой (более 50%) спустя 24 месяца хранения в морозильной камере при -20°C в герметичной упаковке. Данный факт свидетельствует о том, что используемые параметры лиофильной сушки и состав применяемых защитных сред позволяют получить лиофилизированные бактерии *P. yeii* и дрожжи *D. hansenii* с высоким процентом выживаемости при длительном сроке хранения до 24 месяцев, что является несомненным преимуществом при использовании чувствительных элементов БПК-биосенсоров на их основе.

Сравнение спектров окисляемых субстратов «влажными» и лиофилизированными микроорганизмами. Эвтрофикация водоёмов происходит из-за наличия органических веществ, поэтому для определения БПК₅ с использованием сенсоров в составе биочувствительного элемента должны применяться микроорганизмы, окисляющие широкий спектр органических соединений. Известно, что лиофилизация микроорганизмов вызывает стресс и часто приводит к изменению метаболической активности [16]. Поэтому

в работе было проведено сравнение спектров окисляемых веществ «влажными» и лиофилизированными клетками бактерий (рис. 4) и дрожжей (рис. 5).

За 100% принят ответ биосенсора на глюкозу (концентрация субстратов 24 ммоль/дм³). Для исследования выбран ряд веществ, значительно снижающих уровень растворённого кислорода в водных объектах. Для лиофилизированной формы бактерий *P. yeii* зарегистрирован ответ биосенсора на формальдегид, что не наблюдалось для «влажной» формы, а также повышение окислительной активности в отношении метанола. Оба вещества являются высокотоксичными, и их окисление лиофилизированными бактериями может свидетельствовать об активации ферментных систем бактерий после воздействия стрессовых факторов при лиофилизации [16].

Для лиофилизированной формы дрожжей зафиксировано увеличение относительной окислительной активности к углеводам по сравнению с «влажной» биомассой. Процесс лиофилизации не оказывает существенного влияния на спектр окисляемых субстратов бактериями *P. yeii* и дрожжами *D. hansenii*, что даёт возможность успешно применять лиофилизированную форму микроорганизмов для оценки БПК₅.

Характеристики БПК-биосенсоров. Для создания быстро и легко заменяемых (или одноразовых) чувствительных элементов БПК-биосенсоров предполагается фасовка лиофилизированных микроорганизмов в требуемом количестве в герметичную упаковку. Поэтому необходимо подобрать массу наносимых на кислородный датчик лиофилизированных клеток. С этой целью было сформировано пять биочувствительных элементов на основе бактерий *P. yeii* с массой лиофилизированных микроорганизмов от 2,5 до 7,5 мг ((14±1)·10⁹ КОЕ/г сухого препарата). При этом выбраны бактериальные, а не сложноорганизованные дрожжевые клетки, поскольку они позволяют получать более быстрые отклики биосенсора. Для дрожжей *D. hansenii* создан биочувствительный элемент с массой 5 мг ((20±1)·10⁴ КОЕ/г сухого препарата). По экспериментальным данным построены градуировочные зависимости откликов биосенсоров от БПК₅ (рис. 6а, см. цв. вкладку V).

Биокатализаторы на основе целых клеток микроорганизмов являются рецепторами каталитического типа, так как ответ в таких системах обеспечивается ферментативными реакциями микроорганизмов. В связи с этим зависимости, приведённые на рисунке 6а, хорошо аппроксимируются уравнением типа Михаэлиса-Ментен:

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики БПК-биосенсоров на основе лиофилизированных бактерий *P. yeii* и дрожжей *D. hansenii* / Main characteristics of BOD biosensors based on lyophilized bacteria *P. yeii* and yeast *D. hansenii*

Характеристики / Characteristic	Микроорганизмы / Microorganism					
	<i>P. yeii</i>					<i>D. hansenii</i>
Номер биочувствительного элемента No. of the biosensitive element	1	2	3	4	5	6
Масса микроорганизмов на электроде, кг·10 ⁻⁶ Mass of microorganisms on the electrode, kg·10 ⁻⁶	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	5,0
Коэффициент чувствительности, с ⁻¹ ·10 ⁻⁵ Sensitivity coefficient, s ⁻¹ ·10 ⁻⁵	20,0±1,4	20,0±2,6	100±6	50,0±2,2	30,0±2,3	50±4
Диапазон определения БПК ₅ , мг/дм ³ Range of determined BOD ₅ contents, mg/dm ³	2,8–90	1,2–40	0,5–44	1,0–54	0,8–60	0,4–14
Операционная стабильность (15 измерений), % Operational stability (15 measurements), %	3,0	6,6	4,4	3,8	3,8	4,5
Долговременная стабильность, сутки Long-time stability, days	9	6	12	6	7	42
Время единичного анализа, мин Duration of single measurement, min	6–8	6–8	5–7	5–7	6–8	5–7

Примечание: титр бактерий *P. yeii* составлял (14±1) · 10⁹ КОЕ/г сухого препарата, титр дрожжей *D. hansenii* – (20±1) · 10⁴ КОЕ/г сухого препарата.

Note: the titer of *P. yeii* bacteria was (14±1) · 10⁹ CFU/g of dry preparation, the titer of *D. hansenii* yeast was (20±1) · 10⁴ CFU/g of dry preparation.

Таблица 2 / Table 2

Сравнение характеристик разработанных БПК-биосенсоров с существующими аналогами
Comparison of the developed BOD biosensor characteristics with existing analogues

Микроорганизм / метод иммобилизации Microorganism / method of immobilization	Диапазон БПК ₅ , мг/дм ³ Range BOD ₅ , mg/dm ³	Операционная и долговременная стабильность Operational and long-time stability	Время анализа, мин Measurement time, min	Ссылка Link
<i>P. yeii</i> В-3302 лиофилизированные / капсулирование (КОЕ 7·10 ⁸) lyophilized / encapsulation (CFU 7·10 ⁸)	0,5–44	4,4% / 12 дней / days	5–7	данные авторов authors' data
<i>P. yeii</i> В-3302 / включение в гель entrapment in gel	0,05–5,0	7% / 45 дней / days	4–6	[26]
<i>D. hansenii</i> Y-2482 лиофилизированные / капсулирование (КОЕ 1·10 ³) lyophilized / encapsulation (CFU 1·10 ³)	0,4–14	4,5% / 42 дня / days	5–7	данные авторов authors' data
<i>D. hansenii</i> / включение в гель entrapment in gel	0,7–206,7	4,2% / 20 дня / days	5–7	[2]
<i>D. hansenii</i> Y-2482 / включение в золь-гель (КОЕ 6,5·10 ⁶) entrapment in sol-gel (CFU 6.5·10 ⁶)	0,5–5,0	6,7% / 40 дня / days	–	[27]
<i>Pseudomonas putida</i> / адсорбция adsorption	0,5–10	10 дней / days	15	[28]
<i>Escherichia coli</i> / адсорбция (10 ⁶ –10 ⁸ КОЕ/мл) adsorption (10 ⁶ –10 ⁸ CFU/mL)	До 225	42 дня / days	–	[29]
Биоплёнка микроорганизмов из сточных вод / включение в гель Biofilm of microorganisms from waste water / entrapment in gel	2–64	2,1% / 60 дней / days	10	[30]
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> / включение в гель (2·10 ⁵ КОЕ/см ²) entrapment in gel (2·10 ⁵ CFU/cm ²)	5–100	3,6%	10	[31]
Активный ил / включение в гель Activated sludge / entrapment in gel	1–100	2,9% / 65 дней / days	9	[32]
<i>P. yeii</i> SPB1 / адсорбция adsorption	1,3–200	2,9% / 22 дня / days	4–6	[33]
<i>Bacillus subtilis</i> / включение в гель entrapment in gel	4–60	60 дней / days	15	[34]

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.
Note: a dash indicates no data.

$$R = \frac{R_{\max} [S]_0}{K_M + [S]_0} \quad (1)$$

где R_{\max} – максимальный ответ биосенсора (при бесконечно большой концентрации субстрата); K_M – эффективная константа Михаэлиса, численно равная концентрации субстрата, при которой скорость ферментативной реакции достигает половины максимального значения.

Для уменьшения погрешности анализа используют, как правило, линейный уча-

сток градуировочной кривой, ограниченной сверху константой Михаэлиса K_M (рис. 6б, см. цв. вкладку V). Нижняя граница линейного участка соответствует нижней границе определяемых содержаний и рассчитывается статистическим методом, исходя из критерия значения относительного стандартного отклонения результатов измерения ($S_r(C) < 0,33$). Определение основных аналитических и метрологических характеристик БПК-биосенсоров проводили с использованием ГГС (табл. 1).

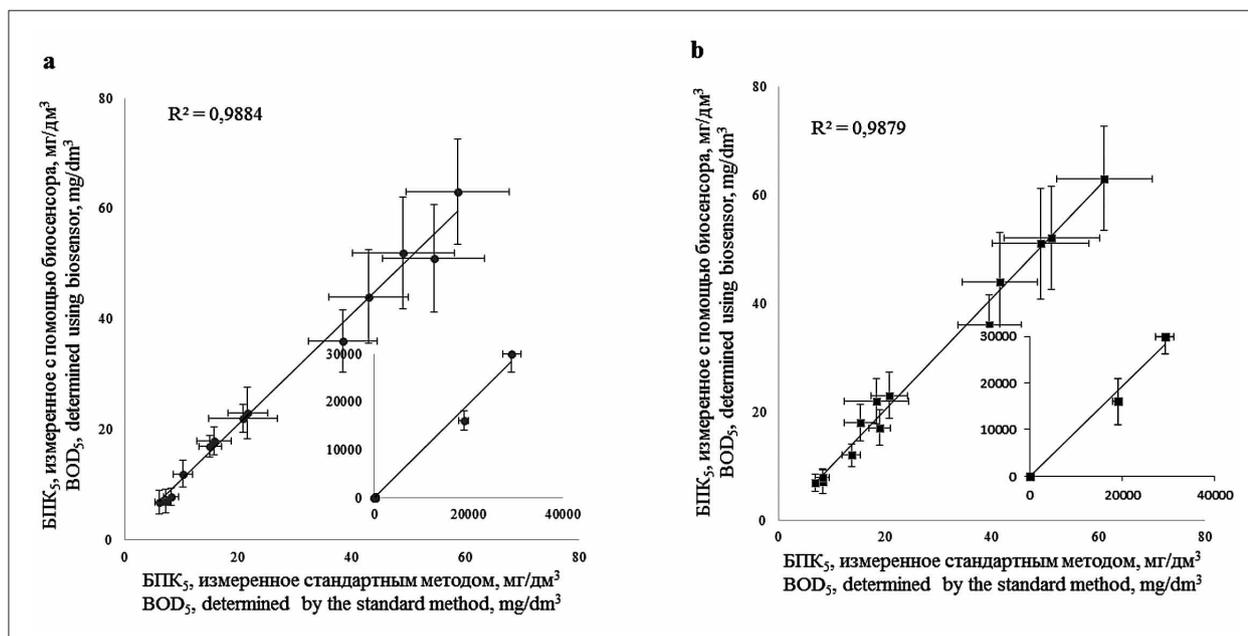


Рис. 7. Корреляция данных, полученных стандартным методом и с помощью биосенсора:

(a) – дрожжи *D. hansenii*, (b) – бактерии *P. yeii*

Fig. 7. Correlation of the results obtained by the standard method and determined using the biosensors: (a) yeast *D. hansenii*, (b) bacteria *P. yeii*

Примечание: во вставках представлена корреляция значений БПК₅ в интервале от 1 до 30000 мг/дм³
 Note: the insets show the correlation of values BOD₅ in the range from 1 to 30000 mg/dm³

При разработке БПК-биосенсоров ключевую роль играют такие характеристики, как нижняя граница определяемых содержаний, чувствительность и операционная стабильность. Для биосенсора на основе бактерий *P. yeii* наибольший коэффициент чувствительности ($100 \pm 6 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-5}$) зарегистрирован при нанесении на кислородный электрод 5 мг сухого препарата. Нижняя граница определяемых содержаний БПК₅ составляет 0,5 мг/дм³, что позволяет анализировать образцы воды категории «чистые» [22]. При дальнейшем увеличении количества биоматериала в биочувствительном элементе коэффициент чувствительности снижается, что является типичным для такого рода систем [23, 24]. При высокой плотности микроорганизмов на электроде практически весь субстрат израсходуется уже в приповерхностных слоях биочувствительного элемента (рис. 2), а в приэлектродном слое происходит обеднение субстратом, т. е. процесс контролируется внутренней диффузией.

Показано (табл. 1), что лиофилизированные бактерии могут функционировать на кислородном электроде в течение 12 сут (снижение окислительной активности микроорганизмов на 50% от максимальной), а дрожжи до 42 сут, что объясняется повышенной устойчивостью эукариотических клеток к негативным факторам окружающей

среды [25]. Применение лиофилизированной формы микроорганизмов создаёт предпосылки к переходу на новый формат анализа – формирование легкозаменяемых биочувствительных элементов с коротким сроком эксплуатации, что позволит избежать возможной контаминации биоматериала.

Из таблицы 2 следует, что после лиофилизации бактерий и дрожжей в целом не происходит значительного изменения основных характеристик БПК-биосенсоров по сравнению с аналогами, где применялась «влажная» биомасса микроорганизмов, иммобилизованных в различные матрицы [2, 26, 27].

БПК-биосенсоры на основе лиофилизированных микроорганизмов превосходят прототипы [28–34] по значению нижней границы определяемых содержаний БПК₅ и отличаются меньшим временем единичного анализа [28–32, 34] (табл. 2). Показано, что повторяемость результатов, полученных на 5 разных электродах с одинаковой массой лиофилизированных бактерий (5 мг), составляет 90%.

Использование нового формата проведения анализа с кислородными датчиками на основе легкозаменяемых биочувствительных элементов с коротким сроком эксплуатации избавит от трудоёмкой и рутинной ежедневной стандартизации.

Анализ образцов воды. Проведён анализ образцов модельных (полупродукты брожения) и природных вод (болотная, вода из прудов и рек в пределах городской зоны) с использованием разработанных БПК-биосенсоров на основе лиофилизированных бактериальных и дрожжевых клеток.

Значения БПК₅, определённые с помощью созданных биосенсоров совпадали со значениями БПК₅, полученными по стандартной методике с учётом доверительного интервала (в интервале от 1 до 30000 мг/дм³). Для биосенсора на основе высушенных дрожжей коэффициент корреляции составил R=0,9969, на основе бактериальных клеток – R=0,9951. Коэффициент корреляции для созданных биосенсоров сопоставим со значениями R, полученными для большинства ранее описанных аналогов [1–3, 26, 29–34].

Заключение

В работе показана возможность использования лиофилизированных бактерий *Paracoccus yeei* ВКМ В-3302 и дрожжей *Debaryomyces hansenii* ВКМ У-2482 для формирования чувствительных элементов БПК-биосенсоров. Применение в биочувствительном элементе лиофилизированных микроорганизмов позволяет облегчить внедрение БПК-биосенсоров в лаборатории экологического мониторинга, на предприятия и в другие организации, занимающиеся рутинным определением биохимического потребления кислорода по стандартной 5-суточной методике. Длительный срок хранения сухого препарата (до 2 лет) значительно облегчит транспортировку биочувствительных элементов до конечного потребителя, а их низкая стоимость и простота нанесения позволят выполнять анализ в полевых условиях и в любое время, а также не будет требовать постоянной калибровки сенсора. Показано, что процесс лиофилизации не приводит к значительным изменениям метаболической активности микроорганизмов. БПК-биосенсоры на основе лиофилизированных микроорганизмов дают возможность анализировать образцы воды категории «чистая» и не уступают по основным характеристикам ранее разработанным аналогам. С применением лиофилизированных микроорганизмов можно определять индекс БПК проб воды с высокой корреляцией со стандартным методом. Таким образом, применение бактерий *P. yeei* и дрожжей *D. hansenii* в лиофилизированной форме в составе чувствительных элементов БПК-

биосенсоров даёт возможность использования их в прототипах опытных образцов биосенсорных анализаторов для серийного производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности проект № FEWG-2024-0003 (Биокаталитические системы на основе клеток микроорганизмов, субклеточных структур и ферментов в сочетании с наноматериалами).

Литература

1. Jouanneau S., Recoules L., Durand M.J., Boukache A., Picot V., Primault Y., Lakel A., Sengelin., Barillon B., Thouand G. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review // Water research. 2014. V. 49. P. 62–82. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.066
2. Arlyapov V.A., Yudina N.Y., Asulyan L.D., Alferov S.V., Alferov V.A., Reshetilov A.N. BOD biosensor based on the yeast *Debaryomyces hansenii* immobilized in poly(vinyl alcohol) modified by N-vinylpyrrolidone // Enzyme Microb. Technol. 2013. V. 53. No. 4. P. 257–262. doi: 10.1016/j.enzmictec.2013.05.004
3. Kamanina O., Arlyapov V., Rybochkin P., Lavrova D., Podsevalova E., Ponamoreva O. Application of organosilicate matrix based on methyltriethoxysilane, PVA and bacteria *Paracoccus yeei* to create a highly sensitive BOD // 3 Biotech. 2021. V. 11. No. 7. Article No. 331. doi: 10.1007/s13205-021-02863-z
4. Do M.H., Ngo H.H., Guo W., Chang S.W., Nguyen D.D., Liu Y., Varjani S., Kumar M. Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: a critical review // Sci. Total Environ. 2020. V. 742. Article No. 135612. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135612
5. Arlyapov V.A., Plekhanova Y.V., Kamanina O.A., Nakamura H., Reshetilov A.N. Microbial biosensors for rapid determination of biochemical oxygen demand: Approaches, tendencies and development prospects // Biosensors. 2022. V. 12. No. 10. Article No. 842. doi: 10.3390/bios12100842
6. Rojas-Villacorta W., Rojas-Flores S., De La Cruz-Noriega M., Chinchay Espino H., Diaz F., Gallozzo Cardenas M. Microbial biosensors for wastewater monitoring: Mini-review // Processes. 2022. V. 10. Article No. 2002. doi: 10.3390/pr10102002
7. Commault A.S., Weld R.J. Whole-cell biosensors for monitoring bioremediation // Biofilms in bioremediation: Current research and emerging technologies / Ed. G. Lear. Ch. 5. Caister Academic Press, 2016. P. 75–92. doi: 10.21775/9781910190296.05
8. Fang D., Gao G., Shen J., Yu Y., Zhi J. A reagentless electrochemical biosensor based on thionine wrapped *E. coli* and chitosan-entrapped carbon nanodots film modified glassy carbon electrode for wastewater toxicity

- assessment // *Electrochim. Acta*. 2016. V. 222. P. 303–311. doi: 10.1016/j.electacta.2016.10.174
9. Козлова Т.Н., Косаренина М.М., Юдина Н.Ю. Влияние негативных факторов среды на окислительную активность лиофилизированных бактерий *Paracoccus yeei* в составе БПК-биосенсора // *Известия ТулГУ. Естественные науки*. 2023. № 4. С. 67–75. doi: 10.24412/2071-6176-2023-4-67-75
10. Шемшединова Э.Ш., Абдураманова Э.Р., Морозкина Е.В., Кацев А.М. Люминесцентные цельноклеточные биосенсоры в детекции экотоксикантов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 2. С. 6–13. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-006-013
11. Abbas M., Adil M., Ehtisham-ul-Haque S., Munir B., Yameen M., Ghaffar A., Shar G.A., Tahir M.A., Iqbal M. *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment: a review // *Sci. Total Environ*. 2018. V. 626. P. 1295–1309. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.066
12. Mohseni M., Abbaszadeh J., Maghool S.S., Chaichi M.J. Heavy metals detection using biosensor cells of a novel marine luminescent bacterium *Vibrio* sp. MM1 isolated from the Caspian Sea // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 148. P. 555–560. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.002
13. Cho J.H., Gao Y., Ryu J., Choi S. Portable, disposable, paper-based microbial fuel cell sensor utilizing freeze-dried bacteria for *in situ* water quality monitoring // *ACS omega*. 2020. V. 5. No. 23. P. 13940–13947. doi: 10.1021/acsomega.0c01333
14. Arlyapov V.A., Kharkova A.S., Kurbanaliyeva S.K., Kuznetsova L.S., Machulin A.V., Tarasov S.E., Melnikov P.V., Ponamoreva O.N., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Use of biocompatible redox-active polymers based on carbon nanotubes and modified organic matrices for development of a highly sensitive BOD biosensor // *Enzyme Microb. Technol.* 2021. V. 143. Article No. 109706. doi: 10.1016/j.enzmictec.2020.109706
15. Pasquarelli A. Bioreceptor immobilization // *Biosensors and Biochips. Learning Materials in Biosciences*. Cham: Springer, 2021. P. 161–184. doi: 10.1007/978-3-030-76469-2_7
16. Abla K.K., Mehanna M.M. Freeze-drying: A flourishing strategy to fabricate stable pharmaceutical and biological products // *Int. J. Pharm.* 2022. V. 628. Article No. 122233. doi: 10.1016/j.ijpharm.2022.122233
17. Arellano-Ayala K., Lim J., Yeo S., Bucheli J.E.V., Todorov S.D., Ji Y., Holzapfel W.H. Rehydration before application improves functional properties of lyophilized *Lactiplantibacillus plantarum* HAC03 // *Microorganisms*. 2021. V. 9. No. 5. Article No. 1013. doi: 10.3390/microorganisms9051013
18. Fonseca F., Marin M., Morris G.J. Stabilization of frozen *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* in glycerol suspensions: Freezing kinetics and storage temperature effects // *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. V. 72. No. 10. P. 6474–6482. doi: 10.1128/AEM.00998-06
19. Crowe J.H., Carpenter J.F., Crowe L.M. The role of vitrification in anhydrobiosis // *Annu. Rev. Physiol.* 1998. V. 60. No. 1. P. 73–103. doi: 10.1146/annurev.physiol.60.1.73
20. Nahr F.K., Mokarram R.R., Hejazi M.A., Ghanbarzadeh B., Sowti Khiyabani M., Benis K.Z. Optimization of the nanocellulose based cryoprotective medium to enhance the viability of freeze dried *L. plantarum* using response surface methodology // *LWT – Food Science and Technology*. 2015. V. 64. No. 1. P. 326–332. doi: 10.1016/j.lwt.2015.06.004
21. Martos G.I., Minahk C.J., de Valdez G.F., Morero R. Effects of protective agents on membrane fluidity of freeze-dried *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* // *Lett. Appl. Microbiol.* 2007. V. 45. No. 3. P. 282–288. doi: 10.1111/j.1472-765X.2007.02188.x
22. Гусева Т.В., Молчанова Я.П., Заика Е.А., Виниченко В.Н., Аверочкин Е.М. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: Справочные материалы. М.: Международный социально-экологический союз, 2000. 148 с.
23. Renslow R.S., Babauta J.T., Majors P.D., Beyenal H. Diffusion in biofilms respiring on electrodes // *Energy Environ. Sci.* 2013. V. 6. No. 2. P. 595–607. doi: 10.1039/c2ee23394k
24. Swaminathan R., Chitra Devi M., Rajendran L., Venugopal K. Sensitivity and resistance of amperometric biosensors in substrate inhibition processes // *J. Electroanal. Chem.* 2021. V. 895. Article No. 115527. doi: 10.1016/j.jelechem.2021.115527
25. Jarque S., Bittner M., Blaha L., Hilscherova K. Yeast biosensors for detection of environmental pollutants: Current state and limitations // *Trends Biotechnol.* 2016. V. 34. No. 5. P. 408–419. doi: 10.1016/j.tibtech.2016.01.007
26. Arlyapov V.A., Yudina N.Y., Asulyan L.D., Kamanina O.A., Alferov S.V., Shumsky A.N., Machulin A.V., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Registration of BOD using *Paracoccus yeei* bacteria isolated from activated sludge // *3 Biotech*. 2020. V. 10. No. 5. Article No. 207. doi: 10.1007/s13205-020-02199-0
27. Ponamoreva O.N., Afonina E.L., Kamanina O.A., Lavrova D.G., Arlyapov V.A., Alferov V.A., Boronin A.M. Yeast *Debaryomyces hansenii* within ORMOSIL shells as a heterogeneous biocatalyst // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2018. V. 54. No. 7. P. 736–742. doi: 10.1134/S0003683818070062
28. Chee G.J. Development and characterization of microbial biosensors for evaluating low biochemical oxygen demand in rivers // *Talanta*. 2013. V. 117. P. 366–370. doi: 10.1016/j.talanta.2013.09.031
29. Zhao L., He L., Chen S., Zou L., Zhou K., Ao X., Liu S., Hu X., Han G. Microbial BOD sensors based on Zr(IV)-loaded collagen fiber // *Enzyme Microb. Technol.* 2017. V. 98. P. 52–57. doi: 10.1016/j.enzmictec.2016.11.010
30. Liu L., Zhai J., Zhu C., Gao Y., Wang Y., Han Y., Dong S. One-pot synthesis of 3-dimensional reduced graphene

oxide-based hydrogel as support for microbe immobilization and BOD biosensor preparation // *Biosens. Bioelectron.* 2015. V. 63. P. 483–489. doi: 10.1016/j.bios.2014.07.074

31. Hu J., Gao G., Xia S. Development of a mediator-type bioelectrochemical sensor based on polypyrrole immobilized ferricyanide and microorganisms for biochemical oxygen demand fast detection // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015. V. 10. No. 11. P. 9695–9705.

32. Niyomdech S., Limbut W., Numnuam A., Asawatreratanakul P., Kanatharana P., Thavarungkul P. A novel BOD biosensor based on entrapped activated sludge in a porous chitosan-albumin cryogel incorporated with graphene and methylene blue // *Sens. Actuators B: Chem.* 2017. V. 241. P. 473–481. doi: 10.1016/j.snb.2016.10.102

33. Харькова А.С., Арляпов В.А., Туровкая А.Д., Автух А.Н., Стародумова И.П., Решетиллов А.Н. Медиаторный БПК-биосенсор на основе клеток микроорганизмов, выделенных из активного ила // *Прикладная биохимия и микробиология.* 2019. Т. 55. № 2. С. 199–209. doi: 10.1134/S0555109919010082

34. Hu J., Li Y., Gao G., Xia S. A mediated BOD biosensor based on immobilized *B. subtilis* on three-dimensional porous graphene-polypyrrole composite // *Sensors.* 2017. V. 17. No. 11. Article No. 2594. doi: 10.3390/s17112594

References

1. Jouanneau S., Recoules L., Durand M.J., Boukabache A., Picot V., Primault Y., Lakel A., Sengelin., Barillon B., Thouand G. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review // *Water research.* 2014. V. 49. P. 62–82. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.066

2. Arlyapov V.A., Yudina N.Y., Asulyan L.D., Alferov S.V., Alferov V.A., Reshetilov A.N. BOD biosensor based on the yeast *Debaryomyces hansenii* immobilized in poly(vinyl alcohol) modified by N-vinylpyrrolidone // *Enzyme Microb. Technol.* 2013. V. 53. No. 4. P. 257–262. doi: 10.1016/j.enzmictec.2013.05.004

3. Kamanina O., Arlyapov V., Rybochkin P., Lavrova D., Podsevalova E., Ponamoreva O. Application of organosilicate matrix based on methyltriethoxysilane, PVA and bacteria *Paracoccus yeei* to create a highly sensitive BOD // *3 Biotech.* 2021. V. 11. No. 7. Article No. 331. doi: 10.1007/s13205-021-02863-z

4. Do M.H., Ngo H.H., Guo W., Chang S.W., Nguyen D.D., Liu Y., Varjani S., Kumar M. Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: a critical review // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 712. Article No. 135612. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135612

5. Arlyapov V.A., Plekhanova Y.V., Kamanina O.A., Nakamura H., Reshetilov A.N. Microbial biosensors for rapid determination of biochemical oxygen demand: Approaches, tendencies and development prospects // *Biosensors.* 2022. V. 12. No. 10. Article No. 842. doi: 10.3390/bios12100842

6. Rojas-Villacorta W., Rojas-Flores S., De La Cruz-Noriega M., Chinchay Espino H., Diaz F., Gallozzo Cardenas M. Microbial biosensors for wastewater monitoring: Mini-review // *Processes.* 2022. V. 10. Article No. 2002. doi: 10.3390/pr10102002

7. Commault A.S., Weld R.J. Whole-cell biosensors for monitoring bioremediation // *Biofilms in bioremediation: Current research and emerging technologies* / Ed. G. Lear. Ch. 5. Caister Academic Press, 2016. P. 75–92. doi: 10.21775/9781910190296.05

8. Fang D., Gao G., Shen J., Yu Y., Zhi J. A reagentless electrochemical biosensor based on thionine wrapped *E. coli* and chitosan-entrapped carbon nanodots film modified glassy carbon electrode for wastewater toxicity assessment // *Electrochim. Acta.* 2016. V. 222. P. 303–311. doi: 10.1016/j.electacta.2016.10.174

9. Kozlova T.N., Kosarenina M.M., Yudina N.Yu. Influence of negative environmental factors on oxidative activity of lyophilized bacteria *Paracoccus yeei* in BOD biosensor composition // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki.* 2023. No. 4. P. 67–75 (in Russian). doi: 10.24412/2071-6176-2023-4-67-75

10. Shemshedinova E.Sh., Abduramanova E.R., Morozkina E.V., Katsev A.M. Luminescent whole-cell biosensors in detection of environmental contaminants (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 2. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-006-013

11. Abbas M., Adil M., Ehtisham-ul-Haque S., Munir B., Yameen M., Ghaffar A., Shar G.A., Tahir M.A., Iqbal M. *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment: a review // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 626. P. 1295–1309. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.066

12. Mohseni M., Abbaszadeh J., Maghool S.S., Chaichi M.J. Heavy metals detection using biosensor cells of a novel marine luminescent bacterium *Vibrio* sp. MM1 isolated from the Caspian Sea // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 148. P. 555–560. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.002

13. Cho J.H., Gao Y., Ryu J., Choi S. Portable, disposable, paper-based microbial fuel cell sensor utilizing freeze-dried bacteria for *in situ* water quality monitoring // *ACS omega.* 2020. V. 5. No. 23. P. 13940–13947. doi: 10.1021/acsomega.0c01333

14. Arlyapov V.A., Kharkova A.S., Kurbanaliyeva S.K., Kuznetsova L.S., Machulin A.V., Tarasov S.E., Melnikov P.V., Ponamoreva O.N., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Use of biocompatible redox-active polymers based on carbon nanotubes and modified organic matrices for development of a highly sensitive BOD biosensor // *Enzyme Microb. Technol.* 2021. V. 143. Article No. 109706. doi: 10.1016/j.enzmictec.2020.109706

15. Pasquarelli A. Bioreceptor immobilization // *Biosensors and Biochips. Learning Materials in Biosciences.* Cham: Springer, 2021. P. 161–184. doi: 10.1007/978-3-030-76469-2_7

16. Abla K.K., Mehanna M.M. Freeze-drying: A flourishing strategy to fabricate stable pharmaceutical and biological products // *Int. J. Pharm.* 2022. V. 628. Article No. 122233. doi: 10.1016/j.ijpharm.2022.122233
17. Arellano-Ayala K., Lim J., Yeo S., Bucheli J.E.V., Todorov S.D., Ji Y., Holzapfel W.H. Rehydration before application improves functional properties of lyophilized *Lactiplantibacillus plantarum* HAC03 // *Microorganisms*. 2021. V. 9. No. 5. Article No. 1013. doi: 10.3390/microorganisms9051013
18. Fonseca F., Marin M., Morris G.J. Stabilization of frozen *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* in glycerol suspensions: Freezing kinetics and storage temperature effects // *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. V. 72. No. 10. P. 6474–6482. doi: 10.1128/AEM.00998-06
19. Crowe J.H., Carpenter J.F., Crowe L.M. The role of vitrification in anhydrobiosis // *Annu. Rev. Physiol.* 1998. V. 60. No. 1. P. 73–103. doi: 10.1146/annurev.physiol.60.1.73
20. Nahr F.K., Mokarram R.R., Hejazi M.A., Ghanbarzadeh B., Sowti Khyabani M., Benis K.Z. Optimization of the nanocellulose based cryoprotective medium to enhance the viability of freeze dried *L. plantarum* using response surface methodology // *LWT – Food Science and Technology*. 2015. V. 64. No. 1. P. 326–332. doi: 10.1016/j.lwt.2015.06.004
21. Martos G.I., Minahk C.J., de Valdez G.F., Morero R. Effects of protective agents on membrane fluidity of freeze-dried *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* // *Lett. Appl. Microbiol.* 2007. V. 45. No. 3. P. 282–288. doi: 10.1111/j.1472-765X.2007.02188.x
22. Guseva T.V., Molchanova Ya.P., Zaika E.A., Vinichenko V.N., Averochkin E.M. Hydrochemical indicators of environmental conditions: Reference materials. Moskva: Mezhdunarodnyy sotsialno-ekologicheskii soyuz, 2000. 148 p. (in Russian).
23. Renslow R.S., Babauta J.T., Majors P.D., Beyenal H. Diffusion in biofilms respiring on electrodes // *Energy Environ. Sci.* 2013. V. 6. No. 2. P. 595–607. doi: 10.1039/c2ee23394k
24. Swaminathan R., Chitra Devi M., Rajendran L., Venugopal K. Sensitivity and resistance of amperometric biosensors in substrate inhibition processes // *J. Electroanal. Chem.* 2021. V. 895. Article No. 115527. doi: 10.1016/j.jelechem.2021.115527
25. Jarque S., Bittner M., Blaha L., Hilscherova K. Yeast biosensors for detection of environmental pollutants: Current state and limitations // *Trends Biotechnol.* 2016. V. 34. No. 5. P. 408–419. doi: 10.1016/j.tibtech.2016.01.007
26. Arlyapov V.A., Yudina N.Y., Asulyan L.D., Kamanina O.A., Alferov S.V., Shumsky A.N., Machulin A.V., Alferov V.A., Reshetilov A.N. Registration of BOD using *Paracoccus yeei* bacteria isolated from activated sludge // *3 Biotech.* 2020. V. 10. No. 5. Article No. 207. doi: 10.1007/s13205-020-02199-0
27. Ponamoreva O.N., Afonina E.L., Kamanina O.A., Lavrova D.G., Arlyapov V.A., Alferov V.A., Boronin A.M. Yeast *Debaryomyces hansenii* within ORMOSIL shells as a heterogeneous biocatalyst // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2018. V. 54. No. 7. P. 736–742. doi: 10.1134/S0003683818070062
28. Chee G.J. Development and characterization of microbial biosensors for evaluating low biochemical oxygen demand in rivers // *Talanta*. 2013. V. 117. P. 366–370. doi: 10.1016/j.talanta.2013.09.031
29. Zhao L., He L., Chen S., Zou L., Zhou K., Ao X., Liu S., Hu X., Han G. Microbial BOD sensors based on Zr(IV)-loaded collagen fiber // *Enzyme Microb. Technol.* 2017. V. 98. P. 52–57. doi: 10.1016/j.enzmictec.2016.11.010
30. Liu L., Zhai J., Zhu C., Gao Y., Wang Y., Han Y., Dong S. One-pot synthesis of 3-dimensional reduced graphene oxide-based hydrogel as support for microbe immobilization and BOD biosensor preparation // *Biosens. Bioelectron.* 2015. V. 63. P. 483–489. doi: 10.1016/j.bios.2014.07.074
31. Hu J., Gao G., Xia S. Development of a mediator-type bioelectrochemical sensor based on polypyrrole immobilized ferricyanide and microorganisms for biochemical oxygen demand fast detection // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015. V. 10. No. 11. P. 9695–9705.
32. Niyomdech S., Limbut W., Numnuam A., Asawatreratanakul P., Kanatharana P., Thavarungkul P. A novel BOD biosensor based on entrapped activated sludge in a porous chitosan-albumin cryogel incorporated with graphene and methylene blue // *Sens. Actuators B: Chem.* 2017. V. 241. P. 473–481. doi: 10.1016/j.snb.2016.10.102
33. Kharkova A.S., Arlyapov V.A., Turovskaya A.D., Avtukh A.N., Starodumova I.P., Reshetilov A.N. A mediated BOD biosensor based on microbial cells isolated from activated sludge // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2019. V. 55. No 2. P. 199–208 (in Russian). doi: 10.1134/S0555109919010082
34. Hu J., Li Y., Gao G., Xia S. A mediated BOD biosensor based on immobilized *B. subtilis* on three-dimensional porous graphene-polypyrrole composite // *Sensors*. 2017. V. 17. No. 11. Article No. 2594. doi: 10.3390/s17112594

Распространение токсигенных цианобактерий в водных объектах на территории Восточно-Европейской равнины

© 2024. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., М. А. Сысолятина¹, аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

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: kutyavinati@gmail.com

На основе литературных данных и результатов собственных исследований проанализировано распространение потенциально токсигенных цианобактерий по водоёмам и рекам, расположенным на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины, и продуцируемых ими цианотоксинов. Среди потенциально токсигенных цианобактерий, наиболее часто обнаруживаемых в водных объектах изучаемой территории, можно выделить представителей рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*, а также виды *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault и *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek. Наличие в водоёмах потенциально токсигенных цианобактерий подтверждено результатами исследований фитопланктона, проведённых с использованием молекулярно-генетических методов. Количественное содержание цианотоксинов определено с использованием иммуноферментных методов анализа, высокоэффективной жидкостной хроматографии, масс-спектрометрии. Отмечено, что в большинстве изученных водоёмов и водотоков наиболее распространёнными являются цианобактерии, продуцирующие микроцистин и анатоксин-а, а продуценты других групп токсинов встречаются реже. Суммарное содержание растворённых в воде микроцистинов в различных водных объектах изменяется в широких пределах: от следовых количеств до 1670 мкг/л при нормативе СанПиН 1.2.3685-21 для микроцистина-LR 1 мкг/л. Максимальное зафиксированное содержание анатоксина-а составляет 0,600 мкг/л.

Ключевые слова: водоём, цианобактерии, цианотоксины, микроцистин, сакситоксин, анатоксин, цилиндроспермопсин.

Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain

© 2024. Т. И. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636[†]

М. А. Sysolyatina¹ ORCID: 0000-0002-7671-3993[†]

Т. Я. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

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: kutyavinati@gmail.com

We analyze the distribution of potentially toxigenic cyanobacteria in water bodies and rivers of the East European (Russian) Plain on the basis of relevant literature and the results of our studies. Special attention is paid to cyanotoxins: microcystins, which are hepatotoxins, cylindrospermopsin, which is hepatotoxin and cytotoxin, and anatoxins and saxitoxins, which are neurotoxins. *Microcystis* and *Dolichospermum* are the most represented genera of potentially toxigenic cyanobacteria, as well as *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault and *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek species. The above are the most commonly found in water bodies of the study area. The presence of potentially toxigenic cyanobacteria in water bodies was confirmed by the results of phytoplankton studies using molecular genetic methods. The quantitative content of the dissolved in water and intracellular cyanotoxins was determined using enzyme immunoassay methods, high-performance liquid chromatography, and mass spectrometry. It was noted that microcystin- and anatoxin-a-producing cyanobacteria are the most common in most of the studied water bodies and

streams, while saxitoxin- and cylindrospermopsin-producing cyanobacteria are less common. The total content of the dissolved microcystins in different water bodies varies from trace amounts up to 1670 µg/L with SanPiN 1.2.3685-21 standard for microcystin-LR 1 µg/L. The maximum recorded anatoxin-a content was 0.600 µg/L. The preparation of this review made it possible to supplement and summarize information on the distribution of toxigenic cyanobacteria and cyanotoxins in rivers, lakes and reservoirs of temperate latitudes, as well as on the quantitative content of cyanotoxins in water.

Keywords: water body, cyanobacteria, cyanotoxins, microcystin, saxitoxin, anatoxin, cylindrospermopsin.

Массовое развитие цианобактерий (ЦБ) отмечается в водоёмах по всему миру, в том числе во всех климатических зонах и федеральных округах России [1, 2]. Наиболее часто в континентальных водоёмах встречается комплекс из четырёх видов ЦБ, включающий в себя потенциальных продуцентов токсинов: *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Dolichospermum flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek и *Dolichospermum lemmermannii* (Richter) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek [3]. Несмотря на широкое повсеместное распространение потенциально токсичных ЦБ, сведения о наличии и распространении токсигенных ЦБ в водоёмах России до сих пор малочисленны и охватывают небольшое количество водных объектов, большей частью расположенных в Северо-Западном [4, 5] и Дальневосточном [6, 7] регионах страны.

Цель нашей работы – провести анализ распространения потенциально токсигенных цианобактерий, идентифицированных с использованием молекулярно-генетических методов анализа, а также цианотоксинов, синтезируемых ими, в водных объектах, расположенных на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины.

Материалы и методы исследований

В обзоре обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей, посвящённые идентификации генетических маркеров токсичности ЦБ во внутренних пресноводных водных объектах. Из всех найденных литературных источников отбирали те, в которых наличие токсигенных ЦБ подтверждено результатами молекулярно-генетического анализа. Поиск источников проводили при помощи систем Яндекс и Google, а также на сайте eLIBRARY.RU по поисковым запросам: «цианобактерии», «цианотоксины», «генетические маркеры токсичности», «ПЦР-анализ», «иммуноферментный анализ», «микроцистин», «анатоксин-а», «сакситоксин»,

«цилиндроспермопсин», «Cyanobacteria», «cyanotoxin», «genetic markers of toxicity», «PCR analysis», «enzyme immunoassay», «microcystin», «anatoxin-a», «saxitoxin», «cylindrospermopsin».

При изучении литературных источников основное внимание уделялось водным объектам, расположенным на территории Восточно-Европейской равнины в пределах России, в связи с тем, что на этой территории находятся крупнейшие российские города, водоснабжение которых осуществляется из крупных рек и водохранилищ, зачастую подверженных «цветению» воды потенциально токсичными ЦБ. Кроме того, так как Восточно-Европейская равнина обладает развитой озёрно-речной сетью, густота и режим которой меняются вместе с климатическими условиями в направлении с севера на юг, изучение различных водных объектов на её территории позволит выявить эколого-географические особенности распространения токсигенных ЦБ и составить прогноз их дальнейшего распространения по водоёмам России.

Разнообразие цианотоксинов в пресноводных водоёмах и их основные особенности

Цианобактерии синтезируют большое количество вторичных метаболитов, при этом особое внимание исследователей привлекают токсины, так как они представляют опасность для жизни и здоровья человека и животных [8]. В соответствии с химической структурой выделяют две основные группы цианотоксинов: циклические пептиды (микроцистины и нодулярины) и алкалоиды (цилиндроспермопсины, анатоксины, сакситоксины) [9, 10]. По действию на органы-мишени цианотоксины разделяют на гепатотоксины (например, микроцистины, цилиндроспермопсины, нодулярины), нейротоксины (анатоксины, сакситоксины, и др.), дерматоксины (лингбиатоксины, аплизиатоксины и др.) и цитотоксины (цилиндроспермопсины и др.) [11].

В данном обзоре мы рассмотрим цианотоксины, наиболее часто встречаемые в поверх-

ностных водах: микроцистины, сакситоксины, анатоксины и цилиндроспермопсины.

Микроцистины (МС) – одни из самых известных и широко распространённых цианотоксинов в пресноводных водоёмах. Впервые они были изолированы из штамма *M. aeruginosa* и названы в соответствии с родовым названием этих ЦБ. В состав МС входят семь аминокислот. Молекулярная масса этих цианотоксинов варьирует от 500 до 4000 Да, для большинства вариантов составляя 900–1100 Да. В настоящее время известно более 200 структурных вариантов МС, обладающих различной токсичностью [12], в том числе идентифицировано более 90 вариантов МС [8], оказывающих токсическое действие на печень, почки и репродуктивную систему [13–15]. Продукентами МС являются ЦБ многих родов, но чаще всего токсичное «цветение» воды вызывают представители рр. *Microcystis*, *Dolichospermum* и *Oscillatoria*. Микроцистины и нодуларины образуются в процессе роста ЦБ. Отличительной особенностью данных цианотоксинов является то, что они преимущественно содержатся внутри клеток ЦБ, а в воду выделяются после лизиса ЦБ. В лиофилизированных клетках ЦБ суммарная концентрация МС может достигать 7,3 мг/г [16], а в воде во время «цветения» водоёмов – 20 мг/л [17]. В 22 странах мира установлены нормативные уровни микроцистина-LR (МС-LR) в питьевой воде. Они составляют от 1 до 1,5 мкг/л [18]. Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) рекомендованы нормативы предельно допустимого содержания МС-LR в питьевой воде: при хроническом воздействии – 1 мкг/л, при краткосрочном – 12 мкг/л, для вод рекреационного назначения – 24 мкг/л [19]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России для питьевых вод, вод водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, плавательных бассейнов и аквапарков предельно допустимая концентрация МС-LR составляет 1 мкг/л.

Сакситоксины (STX), известные также как паралитические яды моллюсков, являются одними из самых сильнодействующих токсинов, широко распространены в пресных и морских водах [20]. Молекулярная масса сакситоксинов составляет от 241 до 491 Да. Известно более 50 токсинов этой группы. Токсическое действие STX связано с селективной блокадой потенциалзависимых Na^+ - и Ca^{2+} -каналов, которые модифицируют воротные механизмы K^+ -каналов в возбудимых клетках, тем самым

влияя на генерацию нервных импульсов и в конечном итоге подавляя мышечную стимуляцию, что приводит к параличу [21]. Уникальность STX заключается в том, что их продуцентами являются не только пресноводные ЦБ, такие как представители рр. *Aphanizomenon*, *Cylindrospermopsis*, *Dolichospermum*, *Lyngbya*, *Planktothrix*, *Raphidiopsis*, но и морские водоросли динофлагелляты [12]. В воде пресных водоёмов концентрация STX варьирует в широких пределах: от следовых количеств до 193 мкг/л [22]. Согласно рекомендациям ВОЗ, предельно допустимое безопасное содержание STX в водоёмах рекреационного назначения составляет 30 мкг/л [21].

Анатоксины наряду с сакситоксинами относятся к нейротоксичным алкалоидам. Одним из самых опасных цианотоксинов этой группы является анатоксин-а (AN-а). Его молекулярная масса составляет 165 Да. Анатоксин-а имитирует действие ацетилхолина, способен сверхстимулировать мышечные клетки, что вызывает мышечное истощение, судороги, конвульсии и удушье из-за аноксии в клетках мозга [20]. Продукентами AN-а могут быть ЦБ нескольких родов, в том числе *Dolichospermum*, *Aphanizomenon*, *Cylindrospermum* и др. [12]. Согласно литературным данным, содержание AN-а в воде пресных водоёмов может достигать нескольких десятков мкг/л [22]. В работе [23] описан случай, когда в пробах воды, отобранных в местах обнаружения ЦБ *Tychonema* sp. в озере Тегел (Германия), концентрация AN-а достигала 1870 мкг/л.

Цилиндроспермопсин (CYN) – трициклический алкалоид, впервые выделенный из ЦБ *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Seenayya & Subba Raju. Молекулярная масса CYN составляет 415 Да. В настоящее время известно более 12 видов-продуцентов этого цианотоксина, в том числе ЦБ рр. *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Chrysochloris* и *Oscillatoria* [24]. Действие CYN может вызывать цирроз и некроз печени, окислительный стресс и повреждение ДНК в клетках. Концентрация CYN в поверхностных водах может достигать 12 мкг/л и более [12]. Интересно, что в воде содержание CYN обычно выше, чем в клетках ЦБ [25]. Согласно рекомендациям ВОЗ, максимально допустимое безвредное содержание CYN в питьевой воде составляет 0,7 мкг/л при хроническом воздействии, 3 мкг/л – при краткосрочном, в водах рекреационного использования норматив содержания CYN равен 6 мкг/л [19].

Стоит отметить, что большинство видов ЦБ образуют более чем один вариант токси-

на. Например, некоторые виды р. *Microcystis* образуют MC-LR и менее токсичный MC-RR [12]. Состав микроцистинов, продуцируемых ЦБ, может варьировать в различных водоёмах и различных климатических условиях. В то же время, виды, продуцирующие цианотоксины в одних климатических условиях, не всегда способны к синтезу токсинов в других условиях. Например, *C. raciborskii* является основным продуцентом СУН в Австралии, Новой Зеландии и Азии, но в Европе, Америке и Африке штаммы этого вида, как правило, не имеют генов биосинтеза данного токсина [12]. В целом, на рост ЦБ и образование токсинов оказывают влияние многие факторы окружающей среды, такие как наличие в воде биогенных элементов, загрязняющих веществ, интенсивность освещения, температура, pH, общее солесодержание и др. Для выявления экологических факторов, оказывающих влияние на образование токсинов ЦБ, важное значение имеют поисковые исследования, направленные на обнаружение и идентификацию цианотоксинов в водоёмах различных территорий.

Распространение и содержание цианотоксинов в водоёмах Восточно-Европейской равнины

Первые публикации работ по идентификации и количественной оценке цианотоксинов в водоёмах России начали появляться в 2000-х гг., что было связано с внедрением в работу научных и производственных организаций высокоточного оборудования и разработкой новых методик анализа. Так, одна из первых работ, посвящённая идентификации AN-а и двух микроцистинов (MC-LR, MC-RR), а также других опасных экотоксикантов в озёрах Сестрорецкий разлив, Суздальское, Щучье и Безымянное, была выполнена с использованием жидкостной хромато-масс-спектрометрии [4]. Авторы работы отмечают, что максимальная концентрация AN-а в период исследования достигала 0,600 мкг/л, а MC – 0,080 мкг/л [4]. В период исследований доминирующее положение в фитопланктоне озёр занимала ЦБ *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek. Позднее, в 2011 г. в оз. Сестрорецкий разлив также были обнаружены MC, максимальная их концентрация достигала 0,34 мкг/л [26], а в 2017 г. концентрация MC-LR в воде из оз. Сестрорецкий разлив достигала 50 мкг/л [27]. Из доминантов «цветения» воды, помимо отмеченного ранее

P. agardhii, также можно выделить следующие виды ЦБ: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Dolichospermum planctonicum* (Brunnthal) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. flos-aquae* (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. spiroides* (Klebahn) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *Microcystis aeruginosa*, *M. wesenbergii* (Komárek) Komárek ex Komárek, *M. viridis* (A. Braun) Lemmermann. В 2018 г. максимальное содержание внутриклеточных MC (всего 11 структурных вариантов) в биомассе ЦБ в период «цветения» воды в оз. Сестрорецкий разлив достигало 3,267 мкг/л, в Нижнем Суздальском озере – 0,228 мкг/л, а в воде озёр не превышало 0,004 мкг/л [28]. Хромато-масс-спектрометр высокого разрешения использовали для определения концентраций MC и AN-а в воде Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ в 2010 г. [29]. Авторы работы отмечают, что AN-а в изучаемых водоёмах обнаружен не был, а суммарное содержание MC составляло от 0,02 до 8,4 мкг/л. Численно и по уровню биомассы на всех водохранилищах доминировали ЦБ *A. flos-aquae* и *M. aeruginosa*. Также хромато-масс-спектрометрия была использована для определения трёх структурных вариантов микроцистинов (MC-LR, MC-RR и MC-YR) в пробах воды из Воронежского водохранилища в 2017 г., при этом суммарное содержание MC в воде на разных участках водохранилища составляло от следовых количеств до 89 мкг/л [30, 31]. В фитопланктоне Воронежского водохранилища доминировали *M. aeruginosa* и его формы, а также *M. ichthyoblabe* (G. Kunze) Kützing. В 2017–2018 гг. проведено определение AN-а и различных вариантов MC в воде Псковского и Чудского озёр [5]. Авторы отмечают, что ни в одной из проанализированных проб AN-а обнаружен не был, содержание MC в воде Чудского озера было незначительное, а в воде Псковского озера достигало значений 0,22 мкг/л [5, 32]. Всего в Псковском и Чудском озёрах обнаружено 9 аргинин-содержащих структурных вариантов MC. Доминирующими таксонами ЦБ в данных озёрах были: *Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, *Woronichinia compacta* (Lemmermann) Komárek & Hindák и виды р. *Aphanocapsa* [5]. В 2019 г. с помощью метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и масс-спектрометрии высокого разрешения определено суммарное содержание MC в «цветущей» воде оз. Святозеро (Республика Карелия) [33]. Оно составило 6,22 мкг/л. Всего

в исследуемых пробах из озера идентифицировано 8 структурных вариантов МС, содержащих в своей структуре аргинин. Хотя в целом для оз. Святозеро не характерно преобладание ЦБ в фитопланктоне (обычно доля ЦБ не превышает 20%), в пятне «цветения» доминировали ЦБ: *M. wesenbergii*, *M. aeruginosa*, *Woronichinia naegeliana* (Unger) Elenkin, *M. ichthyoblabe* и *M. flos-aquae* (Wittrock) Kirchner. Методом ВЭЖХ определено содержание МС в биомассе «цветений», наблюдаемых на Нижнем Суздальском, Красном и Ладожском озёрах Ленинградской области [34]. В каждом из озёр было обнаружено присутствие от 2 до 6 вариантов МС.

Высокое содержание МС, более чем в 5 раз превышающее норматив ВОЗ (1,0 мкг/л), было обнаружено в Куйбышевском водохранилище Республики Татарстан в 2011 г. с использованием иммуноферментного анализа (ИФА) [35]. В работе [36] сообщается, что в пойменных частях Куйбышевского водохранилища концентрации МС достигали 200–470 мкг/л. Метод ИФА позволил определить суммарное содержание МС в воде оз. Нижний Кабан (г. Казань) – 1,52 мкг/л [37]. «Цветение» воды в оз. Нижний Кабан было вызвано *A. flos-aquae*. С помощью ИФА обнаружен МС-LR в воде оз. Неро в 2010 и 2011 гг. в концентрации выше 5,0 мкг/л [38, 39]. Потенциально токсигенными ЦБ в озере являлись виды pp. *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. wesenbergii*, *M. viridis* (A. Braun) Lemmermann, *M. flos-aquae*, *M. novacekii* (Komárek) Compère), *Dolichospermum* (*D. spiroides*, *D. affine* (Lemmermann) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek, *D. flos-aquae*) и *P. agardhii* [38]. Определено суммарное содержание МС в воде Горьковского водохранилища в 2009–2011 гг., оно составляло в разные периоды наблюдений от 0,23 до 725,1 мкг/л [39]. Потенциальными продуцентами МС в этом водохранилище могли быть виды р. *Microcystis*, *D. flos-aquae* и *Gloeotrichia echinulata* P. G. Richter. В апреле-ноябре 2013 г. суммарное содержание МС в воде Горьковского водохранилища изменялось от следовых количеств до 12,5 мкг/л, а в августе в пятнах «цветения» концентрация растворённых в воде МС достигала рекордных 1670 мкг/л [40]. С помощью ИФА проведено количественное определение МС, STX, CYN и AN-а в воде Рыбинского водохранилища [41]. Авторы работы отмечают, что наличие CYN и AN-а в воде данного водохранилища не зафиксировано, STX присутствовали в воде в следовых количествах, а концентрация МС изменялась

в пределах 0,09–5,8 мкг/л. В воде Рыбинского водохранилища выявлено присутствие *mscE*-генсодержащих ЦБ: *M. aeruginosa*, *M. viridis*, *P. agardhii* и видов р. *Dolichospermum*. С помощью ПЦР и ИФА методов обнаружено присутствие 5 вариантов микроцистинов (МС-LR, МС-RR, МС-YR, деметилированные формы [D-Asp³]МС-LR и [D-Asp³]МС-RR) и AN-а в воде Цимлянского водохранилища в 2013 г. [42]. Доминирующие позиции среди ЦБ в Цимлянском водохранилище занимали виды pp. *Microcystis* и *Planktothrix*.

В 2016 и 2018 гг. с помощью молекулярно-генетических методов анализа был проведён анализ распределения цианотоксинов и их потенциальных продуцентов в 12 водохранилищах Волго-Камско-Донского каскада [43]. В ходе исследования было отмечено, что концентрация МС (суммарно внутриклеточной и растворённой в воде фракции) варьировала от значений менее 0,1 мкг/л в июне до 16,4 мкг/л в августе. Доля проб с содержанием МС выше 1 мкг/л составила 25%. Всего было идентифицировано 14 вариантов МС. Потенциальными продуцентами МС в исследуемых водохранилищах были виды pp. *Microcystis* и *Dolichospermum*. В Цимлянском водохранилище как возможные продуценты нейротоксичного AN-а были идентифицированы ЦБ *Cuspidothrix issatschenkoi* (Usachev) P. Rajaniemi, Komárek, R. Willame, P. Hrouzek, K. Kastovská, L. Hoffmann & K. Sivonen и/или *Raphidiopsis mediterranea* Skuja.

Наши исследования, проведённые в летний сезон 2023 г., также подтвердили наличие ЦБ, продуцирующих МС и AN-а, в двух крупнейших водохранилищах Кировской области: Белохолуницком и Омутнинском. Наличие ЦБ, являющихся продуцентами МС, подтверждено успешной амплификацией участка гена *mscE*. Согласно микроскопическому анализу проб фитопланктона, наиболее вероятными продуцентами МС в изучаемых водохранилищах были ЦБ из pp. *Microcystis* и *Dolichospermum*. На большинстве исследованных участков водохранилищ впервые было детектировано развитие ЦБ, способных потенциально продуцировать AN-а, что подтверждено идентификацией методом ПЦР в образцах «планктонной» ДНК специфичного для ЦБ участка гена *anaC*. С помощью микроскопического анализа в фитопланктоне изучаемых водохранилищ обнаружены виды *A. flos-aquae*, *Dolichospermum planctonicum*, *D. flos-aquae* и *C. issatschenkoi*, известные из

литературы как продуценты АН-а. Интересно, что *C. issatschenkoi* часто отмечается среди продуцентов АН-а в водоёмах Европы [44–47], а в водных объектах России встречается реже [43]. Генетические маркеры продуцирования других типов детектируемых цианотоксинов (СУН и СТХ) **не были обнаружены в исследованных пробах из Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ.**

Таким образом, наиболее часто в озёрах и водохранилищах, расположенных на территории Восточно-Европейской равнины, обнаруживаются различные варианты МС. Их концентрации изменяются в широких пределах: от следовых значений до 1670 мкг/л, максимальное содержание другого цианотоксина – АН-а, согласно опубликованным данным, достигало значения 0,600 мкг/л. При этом количество водоёмов, по которым есть опубликованные данные о содержании в них цианотоксинов, до сих пор крайне мало.

Распространение и содержание цианотоксинов в реках Восточно-Европейской равнины

Данные об идентификации и количественной оценке содержания цианотоксинов в реках России ещё реже представлены в литературе, чем данные по озёрам и водохранилищам, хотя питьевое водоснабжение многих населённых пунктов осуществляется именно из рек. Стоит отметить, что высокие скорости течения воды в реках и меньшее по сравнению со стоячими водоёмами прогревание воды сдерживают массовое развитие фитопланктона в реках, в том числе потенциально токсичных видов ЦБ, но тем не менее цианотоксины могут присутствовать в речных водах в значительных количествах. Так, в р. Каме и р. Меше в Республике Татарстан обнаружены МС в концентрации до 0,50 мкг/л при нормативе СанПиН 1.2.3685-21 для МС-LR 1,0 мкг/л [35, 37]. В р. Волге (в районе г. Ярославль) содержание МС также составило 0,50 мкг/л, а в р. Солонице, правом притоке р. Волги, более чем в 5 раз превышало норматив СанПиН [38, 39]. В р. Которосль (Ярославская обл.) в период наблюдений с апреля по октябрь 2013 г. суммарное содержание МС изменялось от 0,04 до 6 мкг/л [40]. Согласно данным работы [48], максимальные концентрации ещё одного распространённого цианотоксина – АН-а в воде р. Дон, являющейся водосточником г. Ростова-на-Дону, и р. Москвы (в месте водозабора Рублевской станции водоподготовки)

составляли 0,557 и 0,327 мкг/л соответственно, а в питьевой воде после водоочистки перед поступлением в разводящую сеть г. Ростова-на-Дону и на выходе с Рублевской станции водоподготовки в г. Москве уже достигали значений 0,231 и 0,529 мкг/л соответственно. Увеличение содержания АН-а в питьевой воде г. Москвы по сравнению с исходной водой, отобранной из водосточника – р. Москвы, авторы объясняют накоплением на загрузках фильтров станции водоподготовки клеток ЦБ, поступающих из р. Москвы во время «цветения» воды, которые постепенно разрушаются, в результате чего происходит выход токсина в воду и его вторичное накопление на фильтрах с последующим вымыванием.

Анализируя работы, посвящённые изучению распространения цианотоксинов в реках и водоёмах, можно отметить, что большинство исследователей уделяют внимание водоёмам: озёрам и водохранилищам. Работы по изучению содержания цианотоксинов в воде рек единичны. В реках, как и в водоёмах, чаще обнаруживаются МС и АН-а, при этом максимальные содержания АН-а, обнаруженные в реках, на порядок ниже содержания МС. Так, на изучаемой нами территории для МС отмечены максимальные содержания более 5 мкг/л, а для АН-а – 0,557 мкг/л.

Заключение

Таким образом, по литературным данным и собственным исследованиям проанализировано распространение потенциально токсигенных ЦБ и продуцируемых ими цианотоксинов по водоёмам и рекам, расположенным на территории Восточно-Европейской (Русской) равнины. В ходе наших исследований обнаружено присутствие в фитопланктоне Омутнинского водохранилища ЦБ *C. issatschenkoi*, которая часто является продуцентом АН-а в европейских водоёмах, а в Российских водных объектах встречается довольно редко. Несмотря на актуальность изучения содержания цианотоксинов в водных объектах, количество опубликованных работ, посвящённых данной теме, до сих пор остаётся ограниченным. Основные причины, влияющие на количество проводимых исследований по идентификации и количественной оценке цианотоксинов в водных объектах: высокая стоимость аналитического оборудования, расходных материалов, в том числе стандартных образцов сравнения для проведения исследований, а также отсутствие квалифицированного пер-

сонала. Вместе с тем, анализ литературных данных показал, что количество исследований, посвящённых изучению цианотоксинов, начиная с 2000-х гг., возрастает и охватывает большее число водных объектов. Повышается качество и глубина проведённых исследований по изучению потенциально токсигенных ЦБ и продуцируемых ими токсинам. Наличие в водных объектах потенциально токсигенных ЦБ подтверждается не только методами световой микроскопии, но и новыми более точными методами качественного и количественного анализа: ИФА, ПЦР-диагностикой, ВЭЖХ и хромато-масс-спектрометрией. Отмечено, что в большинстве изученных водных объектов наиболее часто обнаруживаются микроцистины и анатоксины, реже другие виды цианотоксинов. Содержание МС в воде различных водных объектов изменяется в широких пределах: от следовых количеств до 1670 мкг/л, максимальное зафиксированное содержание АН-а составляет 0,600 мкг/л. Среди потенциально токсигенных ЦБ, наиболее часто обнаруживаемых в водных объектах, можно выделить представителей рр. *Microcystis* и *Dolichospermum*, а также виды *A. flos-aquae* и *P. agardhii*. Подготовка данного обзора позволила дополнить и обобщить сведения о распространении токсигенных ЦБ и цианотоксинов по рекам, озёрам и водохранилищам умеренных широт и о количественном содержании цианотоксинов в воде.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01034).

Литература

1. Namsaraev Z., Melnikova A., Komova A., Ivanov V., Rudenko A., Ivanov E. Algal bloom occurrence and effects in Russia // *Water*. 2020. V. 12. No. 1. Article No. 285. doi: 10.3390/w12010285
2. Barinova S. Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 51–57. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-051-057
3. Намсараев З.Б., Мельникова А.А. Таксономическое разнообразие доминирующих видов цианобактерий во время «цветений» водоёмов России // *Вопросы современной альгологии*. 2022. № 2 (29). С. 29–37. doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-29-37
4. Русских Я.В., Чернова Е.Н., Некрасова Л.В., Воякина Е.Ю., Никифоров В.А., Жаковская З.А. Первые результаты определения новых экотоксикантов в водоёмах Северо-Запада РФ // *Региональная экология*. 2011. № 1-2 (31). С. 82–87.
5. Воякина Е.Ю., Русских Я.В., Чернова Е.Н., Жаковская З.А. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоёмах Северо-Запада России // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 124–129. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129
6. Белых О.И., Тихонова И.В., Кузьмин А.В., Сороковикова Е.Г., Потапов С.А., Галкин А.В., Федорова Г.А. Токсин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоёмах Байкальского региона (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 1. С. 21–27. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
7. Сороковикова Е.Г., Тихонова И.В., Подлесная Г.В., Белых О.И. Оценка и прогноз развития токсичных цианобактерий в фитопланктоне Богучанского водохранилища // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019. № 1 (77). С. 86–93. doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.86-93
8. Белых О.И., Гладких А.С., Сороковикова Е.Г., Тихонова И.В., Потапов С.А., Федорова Г.А. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоёмах России, Беларуси и Украины // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. № 21. С. 363–378.
9. Chorus I., Bartram J. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management*. London: Chapman & Hall, 1999. 446 p.
10. Zurawell R.W., Chen H.R., Burke J.M., Prepas E.E. Hepatotoxic cyanobacteria: A review of the biological importance of microcystins in freshwater environments // *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev.* 2005. V. 8. No. 1. P. 1–37. doi: 10.1080/10937400590889412
11. Калининкова Т.Б., Егорова А.В., Шагидуллин Р.Р. Подход «Единое здоровье» как эффективный способ управления экологическими рисками (на примере цианотоксинов) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2021. № 9. С. 130–145. doi: 10.17076/lim1362
12. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И., Поляк М.С. Цианобактерии и их метаболиты. СПб.: Нестор-История, 2022. 328 с.
13. Botha N., van de Venter M., Downing T.G., Shephard E.G., Gehringer M.M. The effect of intraperitoneally administered microcystin-LR on the gastrointestinal tract of Balb/c mice // *Toxicol.* 2004. V. 43. No. 3. P. 251–254. doi: 10.1016/j.toxicol.2003.11.026
14. Chen L., Chen J., Zhang X., Xie P. A review of reproductive toxicity of microcystins // *J. Hazard. Mater.* 2016. V. 301. P. 381–399. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.041
15. Chen L., Giesy J.P., Adamovsky O., Svirčev Z., Meriluoto J., Codd G.A., Mijovic B., Shi T., Tuo X., Li S.C., Pan B.-Z., Chen J., Xie P. Challenges of using blooms of *Microcystis* spp. in animal feeds: A comprehensive review of nutritional, toxicological and microbial health evaluation // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. Article No. 142319. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142319
16. Zhang Q.-X., Carmichael W.W., Yu M.-J., Li S.-H. Cyclic peptide hepatotoxins from freshwater cyanobacterial (blue-green algae) waterblooms collected in Central

China // Environ. Toxicol. Chem. 1991. V. 10. P. 313–321. doi: 10.1002/etc.5620100303

17. Fastner J., Humpage A. Hepatotoxic cyclic peptides – microcystins and nodularins // Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management / Eds. I. Chorus, M. Welker. Second edition. World Health Organization, 2021. P. 21–52.

18. Егорова Н.А., Кузь Н.В., Синицына О.О. Материалы к обоснованию гигиенического норматива микроцистина-LR в воде водных объектов // Гигиена и санитария. 2018. № 97 (11). С. 1046–1052. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1046-52

19. Дроздова Е.В. Моделирование агрегированной экспозиции химических веществ биологического происхождения при различных видах водопользования на примере приоритетных цианотоксинов // Проблемы здоровья и экологии. 2024. № 21 (2). С. 103–116. doi: 10.51523/2708-6011.2024-21-2-13

20. Волошко Л.Н., Пиневиц А.В. Разнообразие токсинов цианобактерий // Астраханский вестник экологического образования. 2014. № 1 (27). С. 68–80.

21. Pinto A., Macário I.P.E., Marques S.M., Lourenço J., Domingues I., Botelho M.J., Asselman J., Pereira P., Pereira J.L. A short-term exposure to saxitoxin triggers a multitude of deleterious effects in *Daphnia magna* at levels deemed safe for human health // Sci. Total Environ. 2024. V. 951. Article No. 175431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175431

22. Christensen V.G., Khan E. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: A review of anatoxin-a and saxitoxin // Sci. Total Environ. 2020. V. 736. Article No. 139515. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139515

23. Fastner J., Beulker C., Geiser B., Hoffmann A., Kröger R., Teske K., Hoppe J., Mundhenk L., Neurath H., Sagebiel D., Chorus I. Fatal neurotoxicosis in dogs associated with tychoplanktic, anatoxin-a producing *Tycho-nema* sp. in mesotrophic lake Tegel, Berlin // Toxins. 2018. V. 10. Article No. 60. doi: 10.3390/toxins10020060

24. Калининкова Т.Б., Гайнутдинов М.Х., Шагидуллин Р.Р. Методы биотестирования токсинов, продуцируемых цианобактериями (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 2 (14). С. 35–46.

25. Rucker J., Stüken A., Nixdorf B., Fastner J., Chorus I., Wiedner C. Concentrations of particulate and dissolved cylindrospermopsin in 21 *Aphanizomenon*-dominated temperate lakes // Toxicon. 2007. V. 50. No. 6. P. 800–809. doi: 10.1016/j.toxicon.2007.06.019

26. Русских Я.В., Чернова Е.Н., Воякина Е.Ю., Никифоров В.А., Жаковская З.А. Определение цианотоксинов в водной матрице методом высокоэффективной жидкостной хроматографии - масс-спектрометрии высокого разрешения // Известия СПбГТИ (ТУ). 2012. № 17. С. 61–66.

27. Медведева Н.Г., Зиновьева С.В., Зайцева Т.Б. Микробная трансформация микроцистина-LR в образцах природных вод // Региональная экология. 2017. № 2 (48). С. 56–61.

28. Medvedeva N.G., Zaytseva T.B., Kuzikova I.L., Chernova E.N. Microcystin-LR biodestruction by autochthonous microbiota of different water bodies in the Northwest of Russia // Biol. Bull. 2023. V. 50. No. 6. P. 1376–1387. doi: 10.1134/S1062359023600496

29. Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Фитопланктон и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 г. // Вода: химия и экология. 2014. № 8. С. 24–29.

30. Петросян В.С., Анциферова Г.А., Акимов Л.М., Кульнев В.В., Шевырев С.Л., Акимов Е.Л. Оценка и прогноз эколого-санитарного состояния Воронежского водохранилища на 2018–2019 гг. // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 52–56. doi: 10.18412/1816-0395-2019-07-52-56

31. Анциферова Г.А., Шевырев С.Л., Кульнев В.В., Русова Н.И., Галкина Е.С. Эколого-санитарное состояние Воронежского водохранилища в условиях «цветения» вод по материалам 2016–2022 годов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23. № 3. С. 147–154. doi: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154

32. Дрозденко Т.В., Александрова С.М., Антал Т.К., Тихомирова Е.И. Структурные показатели и токсичные виды цианобактерий Псковского озера // Поволжский экологический журнал. 2022. № 4. С. 388–399. doi: 10.35885/1684-7318-2022-4-388-399

33. Смирнова В.С., Теканова Е.В., Калинин Н.М., Чернова Е.Н. Состояние фитопланктона и цианотоксины в пятне «цветения» в озере Святозеро (бассейн Онежского озера, Россия) // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 1 (85). С. 50–60. doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

34. Волошко Л.Н. Токсины и другие биологически активные вещества, синтезируемые цианобактериями в водоёмах Ленинградской области // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 1 (35). С. 28–35.

35. Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Мукминов М.Н. Индикация цианотоксинов в природных водах Республики Татарстан // Ученые записки КГБВМ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 4. С. 341–344.

36. Беспалова К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Питьевое водоснабжение в условиях массового развития синезелёных водорослей на водохранилищах // Водное хозяйство России. 2021. № 2. С. 121–134. doi: 10.35567/1999-4508-2021-2-9

37. Степанова Н.Ю., Халиуллина Л.Ю., Никитин О.В., Латыпова В.З. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоёмов Казанского региона // Вода: химия и экология. 2012. № 11. С. 67–72.

38. Сиделев С.И., Фомичев А.А., Бабаназарова О.В., Зубишина А.А. Выявление микроцистин-продуцирующих цианобактерий в водоёмах Верхней Волги // Микробиология. 2013. Т. 82. № 3. С. 370–371. doi: 10.7868/S0026365613020146

39. Сиделев С.И., Зубишина А.А., Бабаназарова О.В., Кутузова В.Ю., Мартьянов О.В. Мониторинг содержания цианотоксинов микроцистинов в водоемах Верхней Волги: молекулярно-генетический и аналитический подходы // Вода: химия и экология. 2014. № 8 (74). С. 88–94.

40. Сиделев С.И., Бабаназарова О.В. Обнаружение цианобактериальных токсинов в источниках водоснабжения и водопроводной воде некоторых городов России: поиск продуцентов и апробация методов удаления // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 218–229. doi: 10.31857/S0321059620020182

41. Сиделев С.И., Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Зубишина А.А., Плигин Д.Н. Молекулярно-генетическая идентификация и сезонная сукцессия токсигенных цианобактерий в фитопланктоне Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2016. № 4. С. 37–44.

42. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 732–742. doi: 10.7868/S0026365615060130

43. Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Сиделев С.И., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Экология и метаболическая активность цианобактерий крупных разнотипных равнинных водохранилищ Европейской части России // Вопросы современной альгологии. 2021. № 2 (26). С. 29–37. doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-29-37

44. Toporowska M., Pawlik-Skowrońska B., Kalinowska R. Mass development of diazotrophic cyanobacteria (Nostocales) and production of neurotoxic anatoxin-a in a *Planktothrix* (Oscillatoriales) dominated temperate lake // Water Air Soil Pollut. 2016. V. 227. Article No. 321. doi: 10.1007/s11270-016-3004-y

45. Ballot A., Scherer P.I., Wood S.A. Variability in the anatoxin gene clusters of *Cuspidothrix issatschenkoi* from Germany, New Zealand, China and Japan // PLoS One. 2018. V. 13. No. 7. P. e0200774. doi: 10.1371/journal.pone.0200774

46. Karosienė J., Savadova-Ratkus K., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Błaszczyk A., Mazur-Marzec H. First report of saxitoxins and anatoxin-a production by cyanobacteria from Lithuanian lakes // Eur. J. Phycol. 2020. V. 55. No. 3. P. 327–338. doi: 10.1080/09670262.2020.1734667

47. Stoyneva-Gärtner M., Stefanova K., Uzunov B., Radkova M., Gärtner G. *Cuspidothrix* is the first genetically proved anatoxin A producer in Bulgarian lakes and reservoirs // Toxins. 2022. V. 14. No. 11. Article No. 778. doi: 10.3390/toxins14110778

48. Кузь Н.В., Синицына О.О., Турбинский В.В. Результаты изучения эмбриотоксического действия цианотоксина анатоксина-а // Анализ риска здоровью – 2023. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2023: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. / под ред. проф. А.Ю. Поповой, акад.

РАН Н.В. Зайцевой. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. Т. 2. С. 69–74.

References

1. Namsaraev Z., Melnikova A., Komova A., Ivanov V., Rudenko A., Ivanov E. Algal bloom occurrence and effects in Russia // Water. 2020. V. 12. No. 1. Article No. 285. doi: 10.3390/w12010285

2. Barinova S. Environmental preferences of Cyanobacteria in the gradient of macroclimatic factors and pollution // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 51–57. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-051-057

3. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A. Taxonomic diversity of the dominant cyanobacteria species during blooms in water bodies of Russia // Voprosy sovremennoi algologii (Issues of modern algology). 2022. No. 2 (29). P. 29–37 (in Russian). doi: 10.33624/2311-0147-2022-2(29)-29-37

4. Russkikh Ya.V., Chernova E.N., Nekrasova L.V., Voyakina E.Yu., Nikiforov V.A., Zhakovskaya Z.A. First results of determination of new ecotoxicants in water bodies of the North-West of the Russian Federation // Regionalnaya ekologiya. 2011. No. 1-2 (31). P. 82–87 (in Russian).

5. Voyakina E.Ju., Russkikh Ia.V., Chernova E.N., Zhakovskaya Z.A. Toxic cyanobacteria and their metabolites in the lakes of the Russian Northwest // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 124–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-124-129

6. Belykh O.I., Tikhonova I.V., Kuzmin A.V., Sorokovikova E.G., Potapov S.A., Galkin A.V., Fedorova G.A. Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of Baikal region (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027

7. Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Podlesnaya G.V., Belykh O.I. Evaluation and prediction of toxic cyanobacterial blooming in phytoplankton of the Boguchany reservoir // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2019. No. 1 (77). P. 86–93 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.1.86-93

8. Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G., Tikhonova I.V., Potapov S.A., Fedorova G.A. Microcystin-producing cyanobacteria in water bodies of Russia, Belarus and Ukraine // Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. 2013. No. 21. P. 363–378 (in Russian).

9. Chorus I., Bartram J. Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management. London: Chapman & Hall, 1999. 416 p.

10. Zurawell R.W., Chen H.R., Burke J.M., Prepas E.E. Hepatotoxic cyanobacteria: A review of the biological importance of microcystins in freshwater environments // J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev. 2005. V. 8. No. 1. P. 1–37. doi: 10.1080/10937400590889412

11. Kalinnikova T.B., Egorova A.V., Shagidullin R.R. The “one health” approach as a possible mode of ecological risk assessment (example of cyanotoxins) // Trudy Karel-

skogo nauchnogo tsentra RAN. 2021. No. 9. P. 130–145 (in Russian). doi: 10.17076/lim1362

12. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I., Polyak M.S. Cyanobacteria and their metabolites. Sankt-Peterburg: Nestor-Istoriya, 2022. 328 p. (in Russian).

13. Botha N., van de Venter M., Downing T.G., Shephard E.G., Gehringer M.M. The effect of intraperitoneally administered microcystin-LR on the gastrointestinal tract of Balb/c mice // *Toxicon*. 2004. V. 43. No. 3. P. 251–254. doi: 10.1016/j.toxicon.2003.11.026

14. Chen L., Chen J., Zhang X., Xie P. A review of reproductive toxicity of microcystins // *J. Hazard. Mater.* 2016. V. 301. P. 381–399. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.08.041

15. Chen L., Giesy J.P., Adamovsky O., Svirčev Z., Meriluoto J., Codd G.A., Mijovic B., Shi T., Tuo X., Li S.C., Pan B.-Z., Chen J., Xie P. Challenges of using blooms of *Microcystis* spp. in animal feeds: A comprehensive review of nutritional, toxicological and microbial health evaluation // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. Article No. 142319. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142319

16. Zhang Q.-X., Carmichael W.W., Yu M.-J., Li S.-H. Cyclic peptide hepatotoxins from freshwater cyanobacterial (blue-green algae) waterblooms collected in Central China // *Environ. Toxicol. Chem.* 1991. V. 10. P. 313–321. doi: 10.1002/etc.5620100303

17. Fastner J., Humpage A. Hepatotoxic cyclic peptides – microcystins and nodularins // *Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management* / Eds. I. Chorus, M. Welker. Second edition. World Health Organization, 2021. P. 21–52.

18. Egorova N.A., Kuz N.V., Sinitsyna O.O. Materials for the substantiation of the hygienic standard of microcystin-LR in water of water objects // *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018. No. 97 (11). P. 1046–1052 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1046-52

19. Drazdova AV. Modeling of aggregated exposure to chemical substances of biological origin for various types of water use in case of priority cyanotoxins // *Health and Ecology Issues*. 2024. No. 21 (2). P. 103–116 (in Russian). doi: 10.51523/2708-6011.2024-21-2-03

20. Voloshko L.N., Pinevich A.V. Diversity of cyanobacterial toxins // *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2014. No. 1 (27). P. 68–80 (in Russian).

21. Pinto A., Macário I.P.E., Marques S.M., Lourenço J., Domingues I., Botelho M.J., Asselman J., Pereira P., Pereira J.L. A short-term exposure to saxitoxin triggers a multitude of deleterious effects in *Daphnia magna* at levels deemed safe for human health // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 951. Article No. 175431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175431

22. Christensen V.G., Khan E. Freshwater neurotoxins and concerns for human, animal, and ecosystem health: A review of anatoxin-a and saxitoxin // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 736. Article No. 139515. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139515

23. Fastner J., Beulker C., Geiser B., Hoffmann A., Kröger R., Teske K., Hoppe J., Mundhenk L., Neurath H., Sagebiel D., Chorus I. Fatal neurotoxicosis in dogs associated with tychoplanktic, anatoxin-a producing *Tycho-nema* sp. in mesotrophic lake Tegel, Berlin // *Toxins*. 2018. V. 10. Article No. 60. doi: 10.3390/toxins10020060

24. Kalinnikova T.B., Gainutdinov M.Kh., Shagidullin R.R. Methods for bioassay of toxins produced by cyanobacteria (review) // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 2018. No. 2 (14). P. 35–46 (in Russian).

25. Rucker J., Stuken A., Nixdorf B., Fastner J., Chorus I., Wiedner C. Concentrations of particulate and dissolved cylindrospermopsin in 21 *Aphanizomenon*-dominated temperate lakes // *Toxicon*. 2007. V. 50. No. 6. P. 800–809. doi: 10.1016/j.toxicon.2007.06.019

26. Russkikh Ya.V., Chernova E.N., Voyakina E.Yu., Nikiforov V.A., Zhakovskaya Z.A. Determination of cyanotoxins in aqueous matrix by high-performance liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry // *Izvestiya SPbGTI (TU)*. 2012. No. 17. P. 61–66 (in Russian).

27. Medvedeva N.G., Zinov'eva S.V., Zaytseva T.B. Microbial transformation of microcystine-LR in samples of natural water // *Regionalnaya ekologiya*. 2017. No. 2 (48). P. 56–61 (in Russian).

28. Medvedeva N.G., Zaytseva T.B., Kuzikova I.L., Chernova E.N. Microcystin-LR biodestruction by autochthonous microbiota of different water bodies in the Northwest of Russia // *Biol. Bull.* 2023. V. 50. No. 6. P. 1376–1387. doi: 10.1134/S1062359023600496

29. Korneva L.G., Soloveva V.V. Phytoplankton and cyanotoxin content in the Rybinsk, Gorky and Cheboksary reservoirs during the abnormally hot summer of 2010 // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2014. No. 8. P. 24–29 (in Russian).

30. Petrosyan V.S., Antsiferova G.A., Akimov L.M., Kulnev V.V., Shevyrev S.L., Akimov E.L. Assessment and forecast of the ecological and sanitary condition of the Voronezh reservoir for 2018–2019 // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2019. V. 23. No. 7. P. 52–56 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-07-52-56

31. Antsiferova G.A., Shevyrev S.L., Kulnev V.V., Rusova N.I., Galkina E.S. Ecological and sanitary condition of the Voronezh reservoir in the conditions of “bloom-ing” of waters based on the materials of 2016–2022 // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle*. 2023. V. 23. No. 3. P. 147–154 (in Russian). doi: 10.18500/1819-7663-2023-23-3-147-154

32. Drozdenko T.V., Aleksandrova S.M., Antal T.K., Tikhomirova E.I. Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022. No. 4. P. 388–399 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2022-4-388-399

33. Smirnova V.S., Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Chernova E.N. Phytoplankton status and cyanotoxins in the “bloom” spot in Lake Svyatozero (Onega Lake basin, Russia) // *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2021.

No. 1 (85). P. 50–60 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2021.26.1.50-60

34. Voloshko L.N. Cyanobacterial toxins and the other bioactive compound in water bodies of the Leningrad region // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2016. No. 1 (35). P. 28–35 (in Russian).

35. Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Mukminov M.N. Indication of cyanotoxins in natural waters of the Republic of Tatarstan // Uchenye zapiski KGAVM im. N.E. Bauman. 2012. No. 4. P. 341–344 (in Russian).

36. Bespalova K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Drinking water supply under conditions of mass development of blue-green algae on reservoirs // Vodnoe khozyaystvo Rossii. 2021. No. 2. P. 121–134 (in Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2021-2-9

37. Stepanova N.Yu., Khaliullina L.Yu., Nikitin O.V., Latypova V.Z. Structure and toxicity of cyanobacteria in recreational areas of water bodies of the Kazan region // Voda: khimiya i ekologiya. 2012. No. 11. P. 67–72 (in Russian).

38. Sidelev S.I., Fomichev A.A., Babanazarova O.V., Zubishina A.A. Identification of microcystin-producing cyanobacteria in Upper Volga water bodies // Mikrobiologiya. 2013. V. 82. No. 3. P. 370–371 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365613020146

39. Sidelev S.I., Zubishina A.A., Babanazarova O.V., Kutuzova V.Yu., Martyanov O.V. Monitoring the content of microcystin cyanotoxins in Upper Volga water bodies: molecular-genetic and analytical approaches // Voda: khimiya i ekologiya. 2014. No. 8 (74). P. 88–94 (in Russian).

40. Sidelev S.I., Babanazarova O.V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water of some Russian cities: search for producers and approbation of removal methods // Vodnye resursy. 2020. V. 47. No. 2. P. 218–229 (in Russian). doi: 10.31857/S0321059620020182

41. Sidelev S.I., Korneva L.G., Solovyeva V.V., Zubishina A.A., Pligin D.N. Molecular genetics identification and seasonal dynamics of toxigenic cyanobacteria in phytoplankton of the Rybinsk Reservoir (Russia) // Biologiya vnutrennikh vod. 2016. No. 4. P. 37–44 (in Russian).

42. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh I.V. Analysis of phytoplankton in Tsimlyansk Reservoir (Russia) for the presence of cyanobacterial hepatotoxic and neurotoxins // Mikrobiologiya. 2015. V. 84. No. 6. P. 732–742 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365615060130

43. Korneva L.G., Solovyeva V.V., Sidelev S.I., Chernova E.N., Russkikh Y.V. Ecology and metabolic activity of cyanobacteria in large different types of lowland reservoirs in the European part of Russia // Voprosy sovremennoi algologii (Issues of modern algology). 2021. No. 2 (26). P. 29–37 (in Russian). doi: 10.33624/2311-0147-2021-2(26)-29-37

44. Toporowska M., Pawlik-Skowrońska B., Kalinowska R. Mass development of diazotrophic cyanobacteria (Nostocales) and production of neurotoxic anatoxin-a in a *Planktothrix* (Oscillatoriales) dominated temperate lake // Water Air Soil Pollut. 2016. V. 227. Article No. 321. doi: 10.1007/s11270-016-3004-y

45. Ballot A., Scherer P.I., Wood S.A. Variability in the anatoxin gene clusters of *Cuspidothrix issatschenkoii* from Germany, New Zealand, China and Japan // PLoS One. 2018. V. 13. No. 7. P. e0200774. doi: 10.1371/journal.pone.0200774

46. Karosienė J., Savadova-Ratkus K., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Błaszczuk A., Mazur-Marzec H. First report of saxitoxins and anatoxin-a production by cyanobacteria from Lithuanian lakes // Eur. J. Phycol. 2020. V. 55. No. 3. P. 327–338. doi: 10.1080/09670262.2020.1734667

47. Stoyneva-Gärtner M., Stefanova K., Uzunov B., Radkova M., Gärtner G. *Cuspidothrix* is the first genetically proved anatoxin A producer in Bulgarian lakes and reservoirs // Toxins. 2022. V. 14. No. 11. Article No. 778. doi: 10.3390/toxins14110778

48. Kuz N.V., Sinitsyna O.O., Turbinskiy V.V. Results of the study of embryotoxic effect of cyanotoxin anatoxin-a // Health Risk Analysis – 2023. In conjunction with the international meeting on environment and health RISE-2023: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: v 2 tomah / Eds. A.Yu. Popova, N.V. Zaytseva. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2023. V. 2. P. 69–74 (in Russian).

Оценка степени высвобождения и токсичности соединений цинка, используемых в фармацевтических и косметических средствах

© 2024. А. И. Фокина, к. б. н., доцент,

А. С. Олькова, д. б. н., доцент,

Вятский государственный университет,

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

e-mail: usr08614@vyatsu.ru

Выполнена оценка степени высвобождения из мазей и токсичности трёх соединений цинка для установления их минимально достаточной концентрации в антибактериальных фармацевтических и косметических средствах. Сравнивали свойства оксида цинка (ZnO), цинковой соли пирролидонкарбоновой кислоты (ZnPCA) и салицилата цинка (Zn(Sal)₂·2H₂O). Степень высвобождения действующих веществ из мазей на основе вазелина (массовая доля соединений цинка равна 1%) определяли методом Кривчинского. Токсичность водных растворов (дистиллированная вода) соединений цинка определяли в билюминесцентном биотесте с использованием бактериального препарата «Эколюм» на основе непатогенного штамма *Escherichia coli*. Установлено, что высокий уровень токсичности достигается при концентрациях солей цинка в растворе 10⁻⁵ моль/дм³, оксида цинка – 10⁻⁴ моль/дм³. Близкое к этому количество Zn²⁺ диффундирует из мазей через полупроницаемую целлофановую мембрану, используемую для изучения диализа, в 50% водно-спиртовой раствор, что составляет всего 0,31% от количества Zn(II), содержащегося в мази с ZnO и 1,59, 1,87% в мазях с ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O соответственно. Таким образом, апробированный подход является экологически и экономически эффективным, так как позволяет определять наименьшую эффективную концентрацию действующих веществ, снижая нагрузку на микробиом человека и окружающей среды.

Ключевые слова: цинк, степень высвобождения, антибактериальный эффект, *Escherichia coli*.

Assessment of the release rate and toxicity of zinc compounds used in pharmaceuticals and cosmetics

© 2024. А. И. Фокина ORCID: 0000-0001-8265-8882[†]

А. С. Олькова ORCID: 0000-0002-5798-8211[†]

Vyatka State University,

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

e-mail: usr08614@vyatsu.ru

The degree of release from ointments and the toxicity of three zinc compounds were assessed to establish their minimum sufficient concentration in antibacterial pharmaceutical and cosmetic products. The properties of zinc oxide (ZnO), zinc pyrrolidone carboxylate (ZnPCA) and zinc salicylate (Zn(Sal)₂·2H₂O) were compared. The release rate of active substances from petrolatum-based ointments (the mass fraction of zinc compounds is 1%) was determined by the Krivchinsky method. A cellophane film for dialysis served as a semipermeable membrane, which was fixed on a glass tube (length 15 cm, cross section 20 mm²). A sample of ointment (2.00 g) was applied to the inner surface of the membrane. The dialysis tube was inserted into a beaker with dialysis medium and immersed to a depth of no more than 3 mm. The toxicity of aqueous solutions (distilled water) of zinc compounds was determined in a bioluminescent biotest using “Ecolume” bacterial preparation based on a non-pathogenic strain of *Escherichia coli*. It was found that a high level of toxicity of is achieved at 10⁻⁵ mol/dm³ zinc salts in a solution, zinc oxide – 10⁻⁴ mol/dm³. A similar amount of Zn²⁺ diffuses from ointments through a semipermeable cellophane membrane used for the study of dialysis into a 50% aqueous alcohol solution. Zinc ion release from ointment with ZnO was only 0.31%, as well as from ointments with ZnPCA and Zn(Sal)₂·2H₂O – 1.59% and 1.87% respectively. Thus, the tested approach is economically and environmentally effective, as it allows you to determine the lowest effective concentration of active substances, reducing the burden on the human microbiome and the environment.

Keywords: zinc, level of release, antibacterial effect, *Escherichia coli*.

Цинк (Zn) является эссенциальным элементом, необходимым большинству живых организмов, поскольку он обеспечивает активность более чем 300 ферментов (щелочная фосфатаза, карбоксипептидаза, ряд дегидрогеназ и т. д.). Рекомендуемый уровень потребления цинка для взрослого человека 15 мг согласно ТР ТС 022/2011 и 3–12 мг/сутки для детей согласно МР 2.3.1.2432-08.

В то же время Zn относится к тяжёлым металлам с многочисленными токсическими эффектами, проявляющимися как на уровне организма, так и экосистемы в целом. Экологические аспекты использования Zn, определение его эссенциальных и токсичных концентраций для разных биологических видов, а также действие многочисленных соединений Zn на живые организмы остаётся актуальным научным вопросом [1, 2].

Различные соединения Zn используют для изготовления средств как наружного применения (мази, гели, крема, шампуни и т. д.), так и внутреннего (БАДы). В рецептуры многих наружных средств они вводятся в качестве антибактериального агента [3], что важно для лечения первичных и вторичных заболеваний кожи [4]. В связи с этим учёные ставят вопрос о безопасности препаратов, содержащих соединения Zn, для человека и окружающей среды [5].

Попадая в организм человека, соединения Zn вызывают увеличение выработки печенью и почками металлопротеинов [6]. Затем повышенная концентрация этой группы белков связывает и другие эссенциальные металлы, в первую очередь, медь, приводя к её дефициту [7]. Другой механизм токсического действия Zn основан на его участии в образовании активных форм кислорода с последующим окислением жизненно важных компонентов клеток, а также дезактивации ферментов организма [8]. Тканеспецифичные эффекты цинка в зависимости от концентрации могут заключаться в нейротоксичности или нейропротекции [9].

При выборе действующего вещества производители средств для наружного применения ориентируются на эффективность веществ и их стоимость. При этом следует учитывать риск использования средств с соединениями цинка не только для человека, но и экосистем [10]. Наличие ПДК цинка в питьевой воде и для водоёмов рыбо-хозяйственного назначения в ГН 2.1.5.315-03 и Приказе Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 указывает на то, что цинк становится загрязняющим веще-

ством при превышении норм. Цинксодержащие средства могут вносить вклад в токсическую нагрузку на естественные экосистемы, но, безусловно, локально: входя в спектр загрязняющих веществ производственных, хозяйственно-бытовых сточных вод.

Спектр соединений цинка, используемых наружно, достаточно широк: от простых по составу (оксид цинка) до сложных, например, хелатов – органических комплексов Zn с аминокислотами, этилендиаминтетраацетатом, салициловой кислотой и т. д. [11, 12]. Их воздействие на патогенную и естественную микробиоту человека и животных зависит от состава соединений цинка [2, 13–15]. Так, оксид цинка токсичен как для грамположительных, так и для грамотрицательных бактерий [13]. Цинковая соль пирролидонкарбоновой кислоты (ZnPCA) обладает не только противомикробными свойствами, но и дополнительно предотвращает старение кожи [16]. Салицилаты цинка – одни из самых эффективных антисептиков и кеталитических средств, которые используются в медицинской практике более 200 лет [17]. Вопрос о выборе действующего вещества и его безопасной концентрации остаётся открытым.

Целью работы было определение степени высвобождения ионов цинка из мазей с цинковой солью пирролидонкарбоновой кислоты, салицилатом цинка и оксидом цинка в модельном эксперименте, а также токсичности этих соединений в отношении бактерий *Escherichia coli* в препарате «Эколюм».

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были соединения цинка: оксид цинка ZnO (марка ХЧ, Россия), цинковая соль пирролидонкарбоновой кислоты ZnPCA (Франция) и салицилат цинка $Zn(Sal)_2 \cdot 2H_2O$, который был синтезирован из оксида цинка и салициловой кислоты по методике [18] с исключением этапа получения карбоната цинка. Состав получившегося соединения устанавливали по ФС.3.1.0161.22. Доказано, что синтезированный салицилат цинка имеет формулу $Zn(Sal)_2 \cdot 2H_2O$. Выбор данных соединений в качестве объектов исследования был обусловлен их широким использованием в фармацевтической и косметической продукции в качестве антибактериальных компонентов.

Готовили мази, смешивая соединения цинка и вазелин медицинский (ГОСТ 3582-84). В экспериментах с модельными мазями на

основе вазелина, содержащих 1,0% соединений цинка, определяли степень высвобождения ионов цинка методом Кривчинского [19]. Полупроницаемой мембраной служила целлофановая плёнка для диализа, контактирующая с одной стороны с модельной мазью, с другой – с 50% водным раствором этилового спирта. Установка, используемая для диализа, состояла из стеклянной трубки длиной 15 см, сечением 20 мм², на один конец которой крепили целлофановую плёнку, и сосуда вместимостью 100 см³. На внутреннюю поверхность мембраны равномерным слоем наносили точную навеску исследуемого образца мази (2,0 г), которую затем неподвижно закрепляли на конце диализной трубки. Диализную трубку вносили в химический стакан с диализной средой и погружали на глубину не более 3 мм. Концентрацию ионов цинка в растворе определяли с помощью цинк-селективного электрода марки ХС-Zn-001 (Россия). Активность ионов цинка в диализной среде измеряли в течение 20 мин, эквивалентном времени высыхания и впитывания мазей на коже. В качестве контроля использовали вазелин без добавления соединений цинка.

Для определения токсичности исследуемых соединений цинка готовили их водные растворы (дистиллированная вода). Серии растворов биотестировали, оценивая угнетение биолюминесценции бактериального препарата «Эколюм» на основе условно непатогенного штамма *E. coli* на приборе «Биотокс» (Россия) согласно ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04. Контролем служила дистиллированная вода без добавок токсикантов. *Escherichia coli* является стандартным тест-организмом для оценки антимикробной активности средств, содержащих соединения цинка [20].

Перед проведением экспериментов методика определения токсичности была валидирована по показателю повторяемость. Установлено, что относительное среднеквадратическое отклонение при определении индекса токсичности суспензии оксида цинка и салицилата цинка составило 8,8%, цинковой соли пирролидонкарбоновой кислоты – 13,2% (P=0,95, n=6).

Результаты и обсуждение

Степень высвобождения ионов цинка. С помощью цинк-селективного электрода устанавливали концентрацию ионов цинка в диализной среде и высчитывали долю ионов Zn²⁺, которая преодолела полупроницаемую целлофановую мембрану, через 20 минут, от всего количества Zn(II) в мази (табл.).

В модельных 1% мазях внесённое количество Zn(II) было разным. Исходная концентрация Zn(II) в мази в форме ZnO была в 3,9 и в 4,6 раз больше, чем в мазях в виде ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O соответственно. Однако, из мази с ZnO в раствор диффундировало всего 0,31% ионов цинка, что в 5,1 и 6,0 раз меньше значения аналогичного показателя для мазей с ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O соответственно. Это объясняется тем, что оксид цинка малорастворим в воде и этиловом спирте, тогда как оцениваемые соли более растворимы. Концентрация ионов цинка в диализной среде из мази с оксидом цинка была близка к величине растворимости данного соединения цинка (порядка 10⁻⁵ моль/дм³ [21]).

Антибактериальная активность. Снижение биолюминесценции препарата «Эколюм», добавленного в растворы соединений цинка, определяли через 30 мин. Диапазон иссле-

Таблица / Table
Степень высвобождения ионов цинка из мазей на основе вазелина в раствор
The degree of release of zinc ions from petroleum jelly-based ointments into solution

Вещество Substance	Исходная концентрация Zn(II) в вазелине, C · 10 ⁴ , моль/дм ³ The initial Zn(II) content, C · 10 ⁴ , mol/dm ³	Диффундирующая концентрация Zn ²⁺ в вазелине, C · 10 ⁴ , моль/дм ³ The diffusing Zn ²⁺ content, C · 10 ⁴ , mol/dm ³	Выход Zn ²⁺ в раствор % Release of Zn ²⁺ into solution, %
ZnO	1082	3,4 (pZn = 3,5)	0,31
ZnPCA	276	4,4 (pZn = 3,4)	1,59
Zn(Sal) ₂ ·2H ₂ O	235	4,4 (pZn = 3,4)	1,87

Примечание: исходная концентрация Zn(II) в вазелине – расчётная величина, исходя из количеств внесённых соединений; диффундирующая концентрация Zn²⁺ в вазелине – расчётная величина, зависящая от концентрации, определённой в диализной среде.

Note: ZnPCA – zinc pyrrolidone carboxylate; Zn(Sal)₂·2H₂O – zinc salicylate dihydrate; the initial Zn(II) content in petrolatum is a calculated value based on the amounts of added compounds; the diffusing Zn²⁺ content in petrolatum is a calculated value depending on the concentration determined in the dialysis medium.

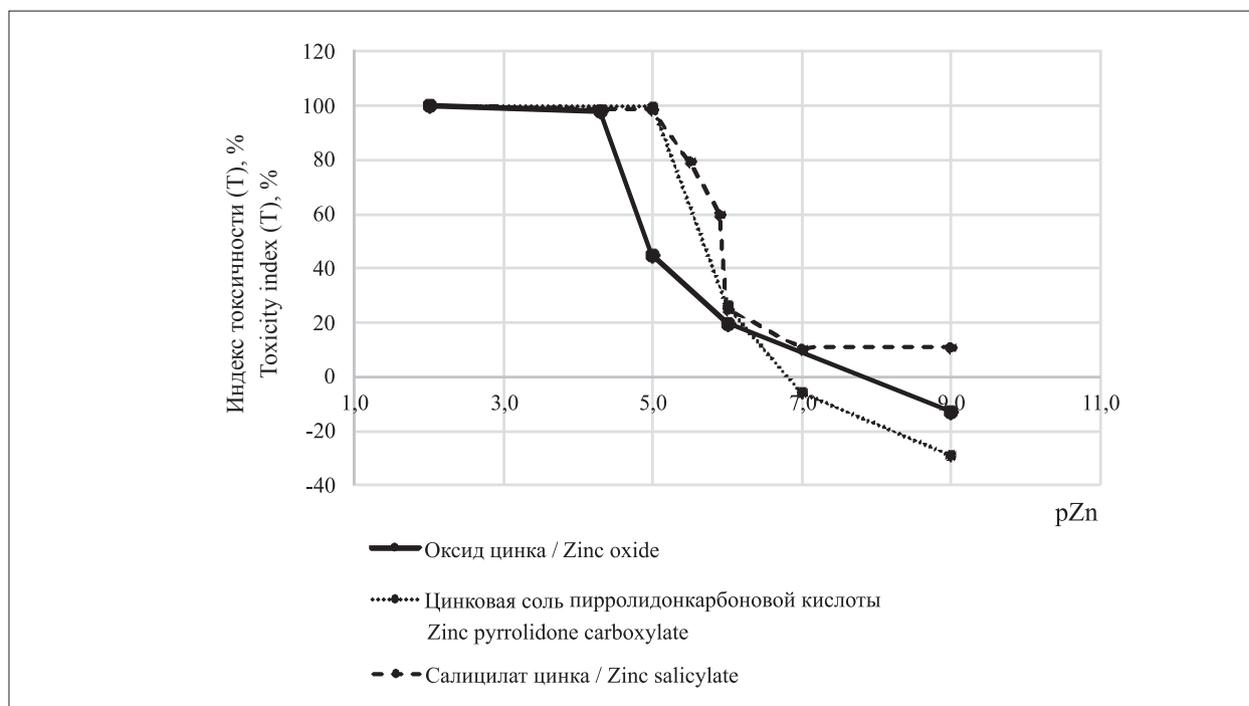


Рис. Кривые «доза-эффект» водных растворов/суспензий ZnO, ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O в отношении бактериального препарата «Эколюм»
Fig. Dose-effect curves of aqueous solutions/suspensions of ZnO, ZnPCA and Zn(Sal)₂·2H₂O for the bacterial preparation “Ecolume”

двумя концентрациями был 10⁻⁹–10⁻² моль/дм³ в расчёте на Zn(II) (рис.).

Антибактериальная активность всех соединений цинка возрастала с увеличением их концентраций в растворах (для ZnO концентрации более 10⁻⁵ моль/дм³ – суспензии). Растворы ZnO и ZnPCA с наименьшей тестируемой концентрацией Zn(II) (10⁻⁹ моль/дм³) не снижали биолюминесценцию препарата на основе *E. coli*, в отличие от аналогичного раствора Zn(Sal)₂·2H₂O, проявляющего антибактериальный эффект и в минимальной концентрации. В диапазоне концентраций соединений цинка 10⁻⁷–10⁻⁵ моль/дм³ все индексы токсичности растворов ZnO были ниже, чем показатели ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O. Максимальное антибактериальное действие суспензии ZnO наблюдалось при концентрации на порядок большей (5·10⁻⁵ моль/дм³), чем у растворов ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O (10⁻⁵ моль/дм³). Следовательно, ZnO обладает меньшей антибактериальной активностью по сравнению с ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O. Салицилат цинка является наиболее токсичным из испытанных веществ.

Литературные данные подтверждают достаточно высокую антибактериальную активность салицилата цинка. Подтверждается меньшая антибактериальная активность окси-

да цинка по сравнению с салицилатом цинка [22–25], что обусловлено растворимостью соединений, возможностью высвобождения ионов цинка(II) в раствор и спецификой компонентов, входящих в состав соединения, кроме цинка [2, 12, 14, 20]. В меньшей степени в литературе уделено внимание ZnPCA, имеющиеся данные также указывают на антибактериальную эффективность соединения [4], однако не позволяют сопоставить его эффекты с действием оксида и салицилата цинка.

Полученные данные сопоставимы с результатами определения чувствительности используемого препарата «Эколюм» к модельному токсиканту – раствору сульфата цинка с pZn = 4,6 (2,6·10⁻⁵ моль/дм³). Его индекс токсичности (T) составляет 98,0 у.е. Растворы/суспензии с ZnO оказались менее токсичными, а с ZnPCA и Zn(Sal)₂ более токсичными по сравнению с растворами модельного токсиканта.

Высокая степень токсичности достигается при концентрациях соединений Zn(II) 10⁻⁵ и 10⁻⁴ моль/дм³. Именно такого порядка концентрации Zn²⁺ диффундируют через полупроницаемую мембрану. Следовательно, концентрация всех действующих веществ в мазях на уровне 1% является достаточной для антибактериального эффекта. Следует иметь в виду, что бактерии, составляющие

естественный микробиом человека и других млекопитающих, часто чувствительнее к токсикантам, чем *E. coli* и патогенные бактерии [26].

Заключение

Соединения цинка используются в косметологии и медицине в качестве добавок, обеспечивающих антимикробное действие, что наряду с полезными свойствами несёт потенциальную опасность, прежде всего для человека и его микробиома. Кроме того, производство цинковых средств может вносить вклад в загрязнение окружающей среды.

В данной работе показано, что соединения цинка – ZnPCA и Zn(Sal)₂·2H₂O на порядок токсичнее, чем ZnO в отношении бактериального препарата «Эколюм» на основе *E. coli*. Одновременно они обладают биодоступностью в 5–6 раз превосходящей показатель для ZnO. Это позволяет использовать их для достижения антибактериального эффекта в меньших количествах, чем оксид цинка. Однако их поведение в окружающей среде требует дальнейшего изучения.

Представленный подход параллельного скрининга степени высвобождения и токсичности нескольких веществ позволяет выбирать соединение для производства продукции и его минимально достаточную концентрацию. Данный подход направлен на снижение токсикологического риска как для человека, так и для организмов в окружающей среде.

Литература

1. Kaur H., Garg N. Zinc toxicity in plants: a review // *Planta*. 2021. V. 253. No. 6. Article No. 129. doi: 10.1007/s00425-021-03642-z
2. Сазанов А.В., Товстик Е.В., Козвонин В.А., Казакова А.А. Оценка биодоступности хелатного цинка в различных типах почвы // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 1. С. 181–187. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-181-187
3. Scott L.N., Fiume M., Zhu J., Bergfeld W.F., Belisito D.V., Hill R.A., Klaassen C.D., Liebler D.C., Marks J.G.Jr., Shank R.C., Slaga T.J., Snyder P.W., Heldreth B. Safety assessment of zinc salts as used in cosmetics // *Int. J. Toxicol.* 2024. V. 27. No. 2 Suppl. P. 5S–69S. doi: 10.1177/10915818241227124
4. Abendrot M., Płuciennik E., Felczak A., Zawadzka K., Piątczak E., Nowaczyk P., Kalinowska-Lis U. Zinc(II) complexes of amino acids as new active ingredients for anti-acne dermatological preparations // *Int. J. Mol. Sci.* 2024. V. 22. No. 4. Article No. 1641. doi: 10.3390/ijms22041641
5. Borowska S., Brzóska M.M. Metals in cosmetics: implications for human health // *J. Appl. Toxicol.* 2015. V. 35. No. 6. P. 551–572. doi: 10.1002/jat.3129
6. Ruttkay-Nedecky B., Nejdil L., Gumulec J., Zitka O., Masarik M., Eckschlager T., Stiborova M., Adam V., Kizek R. The role of metallothionein in oxidative stress // *Int. J. Mol. Sci.* 2013. V. 14. No. 3. P. 6044–6066. doi: 10.3390/ijms14036044
7. Agnew U.M., Slesinger T.L. Zinc toxicity // *StatPearls* [Электронный ресурс] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554548/> (Дата обращения: 27.03.2024).
8. Xu F.F., Imlay J.A. Silver(I), mercury(II), cadmium(II), and zinc(II) target exposed enzymic iron-sulfur clusters when they toxify *Escherichia coli* // *App. Environ. Microbiol.* 2012. V. 78. No. 10. P. 3614–3621. doi: 10.1128/AEM.07368-11
9. Cuajungco M.P., Lees G.J. Diverse effects of metal chelating agents on the neuronal cytotoxicity of zinc in the hippocampus // *Brain Res.* 1998. V. 799. No. 1. P. 97–107. doi: 10.1016/S0006-8993(98)00482-x
10. Sruthi S., Ashtami J., Mohanan P.V. Biomedical application and hidden toxicity of Zinc oxide nanoparticles // *Mater. Today Chem.* 2018. V. 10. P. 175–186. doi: 10.1016/j.mtchem.2018.09.008
11. Wani A.L., Parveen N., Ansari M.O., Ahmad Md.F., Jameel S., Shadab G.G.H.A. Zinc: an element of extensive medical importance // *Curr. Med. Res. Pract.* 2017. V. 7. No. 3. P. 90–98. doi: 10.1016/j.cmrp.2017.02.006
12. Swinkels J.W.G.M., Kornegay E.T., Versteegen M.W.A. Biology of zinc and biological value of dietary organic zinc complexes and chelates // *Nutr. Res. Rev.* 1994. V. 7. No. 1. P. 129–149. doi: 10.1079/NRR19940009
13. Sharma R., Garg R., Kumari A. A review on biogenic synthesis, applications and toxicity aspects of zinc oxide nanoparticles // *EXCLI Journal*. 2020. V. 19. P. 1325–1340. doi: 10.17179/excli2020-2842
14. Kumar B., Devi J., Dubey A., Tufail A., Sharma S. Exploring the antimalarial, antioxidant, anti-inflammatory activities of newly synthesized transition metal(II) complexes bearing thiosemicarbazone ligands: Insights from molecular docking, DFT, MESP and ADMET studies // *Inorg. Chem. Commun.* 2024. V. 159. Article No. 111674. doi: 10.1016/j.inoche.2023.111674
15. Козихонов А.У., Джулаев У.Н., Раджабов У.Р., Шухратзода М., Бобиев Г.М. Исследование процессов образования координационных соединений цинка(II) с аминокислотами // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. 2015. Т. 58. № 7. С. 608–614.
16. Takino Y., Okura F., Kitazawa M., Iwasaki K., Tagami H. Zinc l-pyrrolidone carboxylate inhibits the UVA-induced production of matrix metalloproteinase-1 by *in vitro* cultured skin fibroblasts, whereas it enhances their collagen synthesis // *Int. J. Cosmet. Sci.* 2012. V. 34. No. 1. P. 23–28. doi: 10.1111/j.1468-2494.2011.00676.x
17. Klug H.P., Alexander L.E., Sumner G.G. The crystal structure of zinc salicylate dihydrate // *Acta Cryst.* 1958. V. 11. P. 44–46. doi: 10.1107/S0365110X58000086

18. Шашлова М.Ю., Гребенникова Т.Д., Соловьева М.Е., Киенская К.И., Буторова И.А. Разработка композиций медицинского назначения на основе соединений цинка // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 8. С. 81–83.

19. Сушинская О.А., Голяк Н.С., Царенков В.М. Методы исследования высвобождения лекарственных веществ из наружных лекарственных форм // Вестник фармации. 2019. № 4 (86). С. 86–96.

20. Pasquet J., Chevalier Y., Pelletier J., Couval E., Bouvier D., Bolzinger M.-A. The contribution of zinc ions to the antimicrobial activity of zinc oxide // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2014. V. 457. No. 1. P. 263–274. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.05.057

21. Dirkse T.P. The solubility product constant of ZnO // J. Electrochem. Soc. 1986. V. 133. P. 1656–1657. doi: 10.1149/1.2108985

22. Mishra G., Praharaj P., Pandey S., Parida S. Biodegradable layered double hydroxide based polymeric films for sustainable food packaging applications // Appl. Clay Sci. 2023. V. 240. Article No. 106978. doi: 10.1016/j.clay.2023.106978

23. Cheraghipour K., Azarhazine M., Zivdari M., Beiranvand M., Shakib P., Rashidipour M., Mardanshah O., Mohaghegh M.A., Marzban A. Evaluation of scolicedal potential of salicylate coated zinc nanoparticles against *Echinococcus granulosus* protoscoleces // Exp. Parasitol. 2023. V. 246. Article No. 108456. doi: 10.1016/j.expara.2022.108456

24. Motelica L., Vasile B.-S., Ficai A., Surdu A.-V., Ficai D., Oprea O.C., Andronescu E., Mustătea G., Ungureanu E.L., Dobre A.A. Antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles loaded with essential oils // Pharmaceutics. 2023. V. 15. Article No. 2470. doi: 10.3390/pharmaceutics15102470

25. Хамраева З.Т., Ахмедова З.Р., Шонохунов Т.Э., Мирхалисов М.М., Юнусов Х.Э., Сарымсаков А.А. Изучение антимикробной активности наночастицы серебра и оксида цинка на целлюлозном носителе // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. 2023. № 9 (111) [Электронный ресурс] <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/15858> (Дата обращения: 10.07.2024).

26. Ghazisaedi F., Ciesinski L., Bednorz C., Johans V., Pieper L., Tedin K., Wieler L.H., Günther S. Phenotypic zinc resistance does not correlate with antimicrobial multi-resistance in fecal *E. coli* isolates of piglets // Gut Pathog. 2020. V. 12. Article No. 4. doi: 10.1186/s13099-019-0342-5

References

1. Kaur H., Garg N. Zinc toxicity in plants: a review // Planta. 2021. V. 253. No. 6. Article No. 129. doi: 10.1007/s00425-021-03642-z

2. Sazanov A.V., Tovstik E.V., Kozvonin V.A., Kazakova A.A. Assessment of the bioavailability of chelated zinc in various soil types // Theoretical and Applied Ecology.

2024. No. 1. P. 181–187 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-181-187

3. Scott L.N., Fiume M., Zhu J., Bergfeld W.F., Belsito D.V., Hill R.A., Klaassen C.D., Liebler D.C., Marks J.G.Jr., Shank R.C., Slaga T.J., Snyder P.W., Heldreth B. Safety assessment of zinc salts as used in cosmetics // Int. J. Toxicol. 2024. V. 27. No. 2 Suppl. P. 5S–69S. doi: 10.1177/10915818241227124

4. Abendrot M., Płuciennik E., Felczak A., Zawadzka K., Piąteczak E., Nowaczyk P., Kalinowska-Lis U. Zinc(II) complexes of amino acids as new active ingredients for anti-acne dermatological preparations // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. No. 4. Article No. 1644. doi: 10.3390/ijms22041644

5. Borowska S., Brzóska M.M. Metals in cosmetics: implications for human health // J. Appl. Toxicol. 2015. V. 35. No. 6. P. 551–572. doi: 10.1002/jat.3129

6. Ruttikay-Nedecky B., Nejd L., Gumulec J., Zitka O., Masarik M., Eckschlager T., Stiborova M., Adam V., Kizek R. The role of metallothionein in oxidative stress // Int. J. Mol. Sci. 2013. V. 14. No. 3. P. 6044–6066. doi: 10.3390/ijms14036044

7. Agnew U.M., Slesinger T.L. Zinc toxicity // StatPearls [Internet resource] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554548/> (Accessed: 27.03.2024).

8. Xu F.F., Imlay J.A. Silver(I), mercury(II), cadmium(II), and zinc(II) target exposed enzymic iron-sulfur clusters when they toxify *Escherichia coli* // App. Environ. Microbiol. 2012. V. 78. No. 10. P. 3614–3621. doi: 10.1128/AEM.07368-11

9. Cuajungco M.P., Lees G.J. Diverse effects of metal chelating agents on the neuronal cytotoxicity of zinc in the hippocampus // Brain Res. 1998. V. 799. No. 1. P. 97–107. doi: 10.1016/S0006-8993(98)00482-x

10. Sruthi S., Ashtami J., Mohanan P.V. Biomedical application and hidden toxicity of Zinc oxide nanoparticles // Mater. Today Chem. 2018. V. 10. P. 175–186. doi: 10.1016/j.mtchem.2018.09.008

11. Wani A.L., Parveen N., Ansari M.O., Ahmad Md.F., Jameel S., Shadab G.G.H.A. Zinc: an element of extensive medical importance // Curr. Med. Res. Pract. 2017. V. 7. No. 3. P. 90–98. doi: 10.1016/j.cmrp.2017.02.006

12. Swinkels J.W.G.M., Kornegay E.T., Versteegen M.W.A. Biology of zinc and biological value of dietary organic zinc complexes and chelates // Nutr. Res. Rev. 1994. V. 7. No. 1. P. 129–149. doi: 10.1079/NRR19940009

13. Sharma R., Garg R., Kumari A. A review on biogenic synthesis, applications and toxicity aspects of zinc oxide nanoparticles // EXCLI Journal. 2020. V. 19. P. 1325–1340. doi: 10.17179/excli2020-2842

14. Kumar B., Devi J., Dubey A., Tufail A., Sharma S. Exploring the antimalarial, antioxidant, anti-inflammatory activities of newly synthesized transition metal(II) complexes bearing thiosemicarbazone ligands: Insights from molecular docking, DFT, MESP and ADMET studies // Inorg. Chem. Commun. 2024. V. 159. Article No. 111674. doi: 10.1016/j.inoche.2023.111674

15. Kozichonov A.U., Dzhulaev U.N., Rajabov U.R., Mizhgon Sh., Bobiev G.M. The study of the formation coordination compounds of zinc(II) with aminoacid // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. 2015. No. 7. P. 608–614 (in Russian).
16. Takino Y., Okura F., Kitazawa M., Iwasaki K., Tagami H. Zinc l-pyrrolidone carboxylate inhibits the UVA-induced production of matrix metalloproteinase-1 by *in vitro* cultured skin fibroblasts, whereas it enhances their collagen synthesis // Int. J. Cosmet. Sci. 2012. V. 34. No. 1. P. 23–28. doi: 10.1111/j.1468-2494.2011.00676.x
17. Klug H.P., Alexander L.E., Sumner G.G. The crystal structure of zinc salicylate dihydrate // Acta Cryst. 1958. V. 11. P. 41–46. doi: 10.1107/S0365110X58000086
18. Shashlova M.Yu., Grebennikova T.D., Solovyova M.E., Kienskaya K.I., Butorova I.A. Medical compositions based on zinc compounds // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2022. V. 36. No. 8. P. 81–83 (in Russian).
19. Sushinskaya O.A., Golyak N.S., Tsarenkov V.M. Methods for studying the release of active substances from external drug forms // Vestnik farmacii. 2019. No. 4 (86). P. 86–96 (in Russian).
20. Pasquet J., Chevalier Y., Pelletier J., Couval E., Bouvier D., Bolzinger M.-A. The contribution of zinc ions to the antimicrobial activity of zinc oxide // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2014. V. 457. No. 1. P. 263–274. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.05.057
21. Dirkse T.P. The solubility product constant of ZnO // J. Electrochem. Soc. 1986. V. 133. P. 1656–1657. doi: 10.1149/1.2108985
22. Mishra G., Praharaaj P., Pandey S., Parida S. Biodegradable layered double hydroxide based polymeric films for sustainable food packaging applications // Appl. Clay Sci. 2023. V. 240. Article No. 106978. doi: 10.1016/j.clay.2023.106978
23. Cheraghipour K., Azarhazine M., Zivdari M., Beiranvand M., Shakib P., Rashidipour M., Mardanshah O., Mohaghegh M.A., Marzban A. Evaluation of scolicidal potential of salicylate coated zinc nanoparticles against *Echinococcus granulosus* protoscoleces // Exp. Parasitol. 2023. V. 246. Article No. 108456. doi: 10.1016/j.exppara.2022.108456
24. Motelica L., Vasile B.-S., Fikai A., Surdu A.-V., Fikai D., Oprea O.-C., Andronescu E., Mustătea G., Ungureanu E.L., Dobre A.A. Antibacterial activity of zinc oxide nanoparticles loaded with essential oils // Pharmaceutics. 2023. V. 15. Article No. 2470. doi: 10.3390/pharmaceutics15102470
25. Khamraeva Z.T., Akhmedova Z.R., Shonakhunov T.E., Mirkholisov M.M., Yunusov Kh.E., Sarymsakov A.A. Study of the antimicrobial activity of silver and zinc oxide nanoparticles on a cellulose carrier // Universum: khimiya i biologiya: elektron. nauchn. zhurn. 2023. No. 9 (111) [Internet resource] <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/15858> (Accessed: 11.07.2024).
26. Ghazisaeedi F., Ciesinski L., Bednorz C., Johans V., Pieper L., Tedin K., Wieler L.H., Günther S. Phenotypic zinc resistance does not correlate with antimicrobial multi-resistance in fecal *E. coli* isolates of piglets // Gut Pathog. 2020. V. 12. Article No. 4. doi: 10.1186/s13099-019-0342-5

Почвенные водоросли и цианопрокариоты степных сообществ Байкальской котловины

© 2024. И. Н. Егорова, к. б. н., с. н. с.,
Г. С. Тупикова, ведущий технолог, аспирант,
О. В. Шергина, к. б. н., с. н. с., С. Г. Казановский, к. б. н., доцент, с. н. с.,
Сибирский институт физиологии и биохимии растений
Сибирского отделения Российской академии наук,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 132,
e-mail: egorova@sifibr.irk.ru, galina93shambueva@mail.ru,
sherolga80@mail.ru, skazanowsky@mail.ru

В статье приведены результаты исследований травянистых растительных сообществ Байкальской котловины со значительным участием diaзотрофной цианопрокариоты *Nostoc commune*. Установлены особенности почвенно-растительного покрова. Выявлен состав видов водорослей и цианопрокариот, обитающих в почвах и на их поверхности. Отмечено преобладание цианопрокариот и зелёных водорослей. Определены показатели биомассы макроскопических талломов ностока, формирующихся в условиях горной и настоящих степей. Вид формирует здесь невысокую биомассу (около 2 г/м²), сопоставимую с таковой ряда засушливых территорий Азии. Показаны различия состава альгоцианокомплексов, функционирующих в разных почвенно-растительных условиях относительно небольшой по площади территории исследований. Установлены особенности количественного развития *N. commune* во времени и пространстве.

Ключевые слова: степи, разнообразие почвенных водорослей и цианопрокариот, *Nostoc commune*, юго-западное побережье озера Байкал, физико-химические свойства почв.

Soil algae and cyanoprokaryota of steppe communities of the Baikal basin

© 2024. I. N. Egorova ORCID: 0000-0003-2774-1653
G. S. Tupikova ORCID: 0000-0003-1751-1969, O. V. Shergina ORCID: 0000-0002-6333-8821
S. G. Kazanovsky ORCID: 0000-0003-4453-0006
Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
132, Lermontova St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: egorova@sifibr.irk.ru, galina93shambueva@mail.ru,
sherolga80@mail.ru, skazanowsky@mail.ru

The article presents the results of studies of herbaceous plant communities in the Baikal basin, with the significant participation of the diazotrophic cyanoprokaryota *Nostoc commune*. The territory of the investigation is located at the foot of the Primorskiy range. There are developed mountain, typical steppe, and meadow communities on chestnut soils. A high content of carbonates was found in the soils, and the pH of the upper horizons varied from slightly acidic to alkaline. The composition of algae and cyanoprokaryota species living in and on soils has been revealed. In total, in steppe and meadow communities we identified 71 species from five divisions: Cyanoprokaryota – 27, Bacillariophyta – 4, Ochrophyta – 3, Chlorophyta – 34, and Charophyta – 3. 58 species have been found in steppe communities, 40 in meadow. A predominance of cyanoprokaryota and green algae was noted. The composition of the studied phototrophic species in steppe communities differed significantly from that of the meadow. In steppe communities *Nostoc commune* formed macroscopic colonies, and its biomass production was low (about 2 g/m²) comparable to that of a number of Asia arid territories. The *N. commune* biomass formation was higher on the mountain slope and at its foot, where higher density of soil composition, lower field humidity, as well as an increased content of calcium, magnesium, and sodium was found in soils. The *N. commune* biomass was reduced in the site at a distance from the mountain slope where the content of the above elements was lower. The regular sampling of macrocolonies had a negative impact on their renewal.

Keywords: steppe, diversity of soil algae, *Nostoc commune*, southwest coast of the Lake Baikal, physico-chemical properties of soils.

Степи – необходимый элемент экосистемного разнообразия биосферы, ландшафт, обладающий высокой потенциальной продуктивностью. Они выполняют важные экосистемные функции и предоставляют людям множество экосистемных услуг [1–7]. Растительный покров степей отличается своеобразием и богатым составом сообществ и видов. Со степями связано большое количество эндемичных растений и животных. Ряд степных сообществ относят к рефугиумам флоры и фауны [1, 7–10]. В Байкальском регионе степи располагаются, преимущественно, изолированными участками разной площади среди преобладающей лесной растительности [11]. Степям региона свойственно видовое богатство, типологическое разнообразие и сложная пространственная структура [12–14]. В местах, доступных для освоения человеком, эти экосистемы значительно трансформированы [15].

Неотъемлемым компонентом степного биоценоза являются микроорганизмы. Виды, их количество и распределение, характер жизнедеятельности микробных сообществ и обеспечиваемая ими трансформация вещества и энергии в почве имеют большое значение для понимания функционирования экосистем, включая степные [16, 17]. К важнейшей группе первичных продуцентов принадлежат почвенные водоросли. Наибольшее их число регистрируется в органо-аккумулятивных горизонтах и на поверхности почв [18–20]. В последнем случае, при массовом размножении водоросли наряду с другими организмами (грибами, лишайниками, мохообразными) способны оплетать и/или склеивать частицы почвы полисахаридными выделениями в устойчивый поверхностный слой – биологические почвенные корочки [18–23]. Биологические почвенные корочки образуют сложный мозаичный покров на поверхности обнажённых почв в разных типах растительных сообществ. Они являются неотъемлемой частью почвенной системы в засушливых регионах по всему миру, стабилизируют поверхность почвы, способствуют укоренению сосудистых растений и служат важными источниками экосистемного азота и углерода [24].

Почвенные водоросли – наименее изученный компонент степных и луговых экосистем Байкальского региона. Их исследования здесь до настоящего времени единичны [25–29]. В ранних работах не было выявлено поверхностных разрастаний водорослей на почве. В качестве доминантов почвенных альгогруппировок указывались представители

одноклеточных и сарциноидных (образующих пакеты клеток) зелёных микроводорослей, а также нитчатые одиночные и колониальные цианопрокариоты. Авторские многолетние экспедиционные исследования показали, что степным растительным сообществам этих территорий свойственны разрастания водорослей и цианопрокариот на поверхности почв. Одним из таких видов, принимающих заметное участие в сложении травянистых растительных сообществ, является diaзотрофная цианопрокариота *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet et Flahault [30]. Однако сведения о географическом распределении, экологических функциях, составе и структуре почвенных альгосообществ, в которых доминирует *N. commune*, особенностях функционирования его популяций в разных эколого-географических условиях, ограничены.

Цель работы заключалась в выявлении видового разнообразия водорослей почв степных растительных сообществ со значительным участием *Nostoc commune*, изучении его биомассы, установлении физико-химических свойств почв.

Объекты и методы исследования

Работы проводились в Иркутской области в окрестностях с. Большого Голоустного (Иркутский район), 52°03' N, 105°26' E. Оно расположено на юго-западном побережье оз. Байкал, у подножия Приморского хребта в устье р. Голоустной. Приморский хребет здесь достигает в высоту отметок 900–1200 м над ур. м.; сложен верхнепротерозойскими сильно метаморфизованными карбонатно-силикатными породами (доломиты, известняки, конгломераты, кварциты, песчаники, сланцы) [32]. Климат территории исследований во многом определяется её положением у подножия горной системы, которая выступает как орографический барьер на пути воздушных масс, несущих осадки, и близостью огромных холодных водных масс озера Байкал. Климат сравнительно тёплый (средняя температура воздуха в январе составляет –18,2 °С, в июле –14,1 °С), с положительными среднегодовыми температурами, сухой (около 200–500 мм осадков в год), с безморозным периодом до 80–90 сут, суммой положительных температур 1000–1200 °С [32, 33]. Основная доля осадков приходится на вторую половину лета. Характерна неравномерность выпадения осадков по годам и их распределения в течение года. Испарение преобладает над осадками, вслед-

ствие этого значительную часть года в почве имеется недостаток влаги [33]. В бассейне р. Голоустной наиболее выражены лесохозяйственные, рекреационные, сельскохозяйственные и коммуникационно-транспортные виды деятельности, влияющие на состояние природной среды [34]. Травянистые экосистемы испытывают пастбищную и рекреационную нагрузку. В последние годы заметно возрос поток туристов.

На исследуемой территории в дельте р. Голоустной *Nostoc commune* был обнаружен в травянистых растительных сообществах в нижней части склона Приморского хребта, у его подножия, в антропогенно-нарушенных фитоценозах самого с. Большого Голоустного, а также в пионерных растительных группировках, развивающихся на островах в русле реки и её каменистых берегах. Как правило, талломы вида во многих местах можно наблюдать только в периоды затяжных дождей; обилие крупных слоевищ крайне низкое. Для исследований была выбрана территория в нескольких километрах от поселения, где наблюдали массовое постоянное развитие *N. commune*. Здесь в пределах естественных фитоценозов

по высотному и геоботаническому профилю было заложено три пробные площади (ПП 1, 2, 3) размером около 100 м². Дополнительно в целях сравнения была заложена четвёртая пробная площадь в травянистых сообществах с повышенным увлажнением ближе к берегу Байкала (рис. 1, табл. 1). На каждой из ПП был установлен видовой состав растений, определены физико-химические свойства почв, выявлен состав почвенных водорослей и биомасса макроскопических талломов *N. commune*. Полевые изыскания проводили в июне 2014 г., июле 2018 г. и июле – сентябре 2021 г.

Для выявления качественного состава почвенных водорослей на всех ПП были взяты объединённые пробы поверхностного слоя почвы на глубине 0–5 см. Объединённая проба составлена из 20–25 (40) индивидуальных образцов размером 10 см². Для оценки размеров образуемой *N. commune* биомассы на ПП методом случайной выборки были заложены по 10 учётных площадок (УП) размером 1 м². Всего было заложено 30 УП. На каждой УП собирали все макроколонии вида и составляли из них общую пробу. При отборе образцов

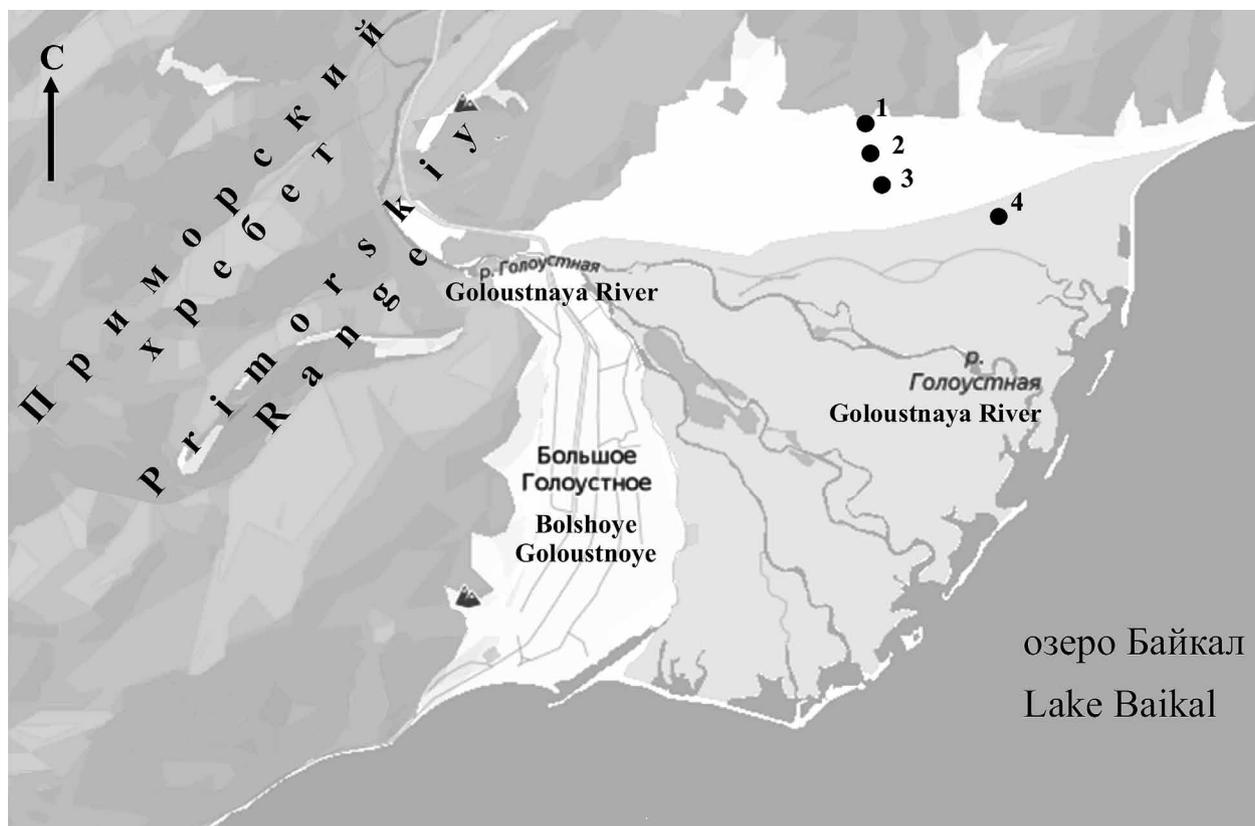


Рис. 1. Территория исследований в окрестностях с. Большого Голоустного. Точками показаны места отбора проб, цифры – № пробной площади (ПП)
 Fig. 1. The research area in the vicinity of the village Bolshoye Goloustnoye. The dots and numbers show the sampling sites (SS)

руководствовались рекомендациями и соблюдали общие правила стерильности [35–37].

Для изучения характеристик почвенного покрова на ПП и УП проводили отбор проб подстилки (до глубины 1 см) и верхних гумусовых горизонтов почв (до глубины 15 см) квадратно-конвертным способом. Кроме того, на каждой из УП в трёхкратной повторности отбирали образцы для определения физических свойств почвы (полевая влажность, пористость, аэрация, плотность сложения, удельный вес) с помощью металлических цилиндров. Для установления типа почв закладывали почвенный разрез недалеко от ПП 1. Основной массив данных по физико-химическим свойствам почв в настоящее время получен для образцов 2018 г.

Все собранные образцы помещали в стерильные бумажные пакеты и транспортировали в лабораторию. Физико-химические свойства почв устанавливали общепринятыми методами [38]. Тип почв приводится в соответствии с опубликованными классификациями [39, 40]. Перед определением массы талломов ностока колонии отмывали и высушивали на воздухе. Водоросли изучали методами прямого микроскопирования и культивирования. Условия и приёмы получения культур и идентификации водорослей такие же, как указывалось ранее [30, 41]. Ряд выделенных из почв штаммов депонирован в коллекцию культур водорослей СИФИБР СО РАН – ИРК – А. Для статистической обработки результатов использованы пакеты программ R (версия 3.5.1 2018 г.) и ExStatR [42].

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показано местонахождение ПП, где проводили исследования. Установлено, что на склоне представлена сибирско-чуйско-нителистниково-разнотравная каменистая (горная) степь (ПП1), сменяющаяся в присклоновой части тонконогово-аргунскоосоково-холоднопопынно-разнотравной (настоящей) степью (ПП2 и ПП3) [по 11]. Ближе к берегу Байкала развит турчаниново-луговиково-остроосоково разнотравный сырой кочкарный луг (ПП4) (рис. 1).

Выявлено, что в районе работ развиты каштановые почвы (табл. 1). Изучение морфологических свойств верхних горизонтов каштановых почв показало, что по окраске, структуре и составу органического и минерального вещества, почвы относятся к среднегумусным и среднесуглинистым (табл. 1).

Характерной чертой профиля исследованных почв является относительно небольшая мощность гумусового горизонта. Это связано с проникновением корневой системы на небольшую глубину, до 30 см. В малоснежные холодные зимы происходит глубокое промерзание почвы, поэтому с наступлением вегетационного периода низкие температуры, удерживающиеся здесь в течение длительного времени, и быстрое иссушение почв препятствуют проникновению корневой системы растений на большую глубину. Обнаружен характерный для каштановых почв иллювиальный горизонт В(АВ). Этот горизонт светло-серого цвета, комковато-зернистой структуры, плотноватый, с постепенным переходом в почвенном профиле по окраске и плотности. Его наличие свидетельствует о том, что в почвенной толще протекает гумусово-элювиальный процесс. В исследуемой почве установлено высокое содержание карбонатов, все образцы интенсивно вскипают на поверхности от соляной кислоты.

Установленные показатели физико-химических свойств почв значительно варьировали в пределах как одной ПП, так и между ними (табл. 1). Это согласуется с известными данными о комплексности и сложности почвенно-растительного покрова в экосистемах гор [15, 43]. На исследованных УП в пределах заложенных ПП в степных сообществах по направлению от горного склона к берегу Байкала в среднем снижались показатели плотности твёрдой фазы, плотности сложения почв, рН, содержание Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} (табл. 1). Полевая влажность, пористость и аэрация были выше в почвах настоящей степи на удалении от склона, также как и содержание K^+ . Содержание водорастворимых соединений азота, фосфора и калия варьировало. Наиболее высокие значения нитратного азота, соединений фосфора и калия в почвах степей зарегистрированы на ПП 2, расположенной у подножия горного склона. Почвы кочкарного луга значительно отличались по установленным показателям физико-химических свойств от почв под степными сообществами (табл. 1).

В исследованных почвах найден 71 вид водорослей из 5 отделов (табл. 2). Наибольшим числом видов представлены зелёные водоросли Chlorophyta – 34, немногим меньше число видов цианопрокариот Cyanoprokaryota – 27, единичны водоросли отделов диатомовых Bacillariophyta – 4 вида, жёлтозелёных Ochrophyta и харофитовых Charophyta водорослей – по 3 представителя. Высокое разнообразие зелёных водорослей и цианопро-

Таблица 1 / Table 1

Характеристика мест сбора почвенно-альгологических образцов
 Characteristics of sites where soil samples with algae and cyanoprokaryota were collected

Характеристика Characteristic	№ ПП / No. of sampling site				
	1	2	3	4	
Местоположение Locality	в нижней части горного склона at the bottom of the mountain slope	у подножия склона at the foot of the slope	на расстоянии 100–150 м от склона at a distance of 100–150 m from the slope	вблизи побережья озера Байкал near the coast of the Baikal Lake	
Высота, м над уровнем моря Altitude, m above sea level	491–520	454–461	452–458	около / about 450	
Растительность Vegetation	горная степь mountain steppe	настоящая степь true steppe	настоящая степь true steppe	сырой кочкарный луг raw tussock meadow	
Тип почв Soil type	каштановая chestnut soil	каштановая chestnut soil	каштановая chestnut soil	лугово-каштановая meadow-chestnut soil	
Плотность сложения, г/см ³ * Density of soil composition, g/cm ³	1,20±0,16	0,99±0,10	0,84±0,10	–	
Плотность твёрдой фазы, г/см ³ * Density of the soil solid phase, g/cm ³	2,47±0,15	2,50±0,22	2,34±0,25	–	
Полевая влажность, %* Field humidity, %	17±5	21±10	26±12	–	
Пористость, %* Porosity, %	51±8	60±4	64±11	–	
Аэрация* Aeration (P _a , %)	31±9	39±11	42±20	–	
pH _{H₂O}	A0	7,63±0,04	7,16±0,35	6,23±0,04	–
	A1	8,03±0,07	7,76±0,21	6,63±0,20	8,12±0,13
pH _{KCl}	A0	7,25±0,07	7,07±0,36	5,98±0,04	–
	A1	7,53±0,15	7,39±0,09	6,23±0,23	7,77±0,16
N _{общ.} , % N _{total} , %	A0	0,67±0,04	0,60±0,10	1,25±0,10	–
	A1	0,70±0,07	0,64±0,11	0,62±0,08	1,57±0,25
C _{орг.} , % C _{org.} , %	A0	5,55±0,10	4,1±1,2	3,77±0,07	–
	A1	3,72±0,25	2,09±0,32	3,35±0,37	7,6±0,7
Гумус, % Humus, %	A0	9,57±0,17	7,1±2,3	6,51±0,12	–
	A1	6,4±0,4	3,6±0,5	5,8±0,6	13,2±1,2
Na ⁺ , мг/кг mg/kg	A0	11,3±1,5	15,9±1,2	9,9±0,4	–
	A1	23,86±0,36	20,4±1,4	14,3±1,4	255±7
K ⁺ , мг/кг mg/kg	A0	473±15	726±70	889±29	–
	A1	323±7	1190±40	389±29	649±14
Mg ²⁺ , мг/кг mg/kg	A0	3110±40	2574±216	1210±7	–
	A1	2690±360	2100±90	1521±22	6840±50
Ca ²⁺ , мг/кг mg/kg	A0	14962±7	13700±260	5898±36	–
	A1	14790±310	13800±600	5665±590	65000±400
N-NO ₃ ⁻ , мг/кг mg/kg	A0	15,1±1,4	47±40**	17,5±0,7	–
	A1	17,1±1,3	26,5±2,7	10,8±2,6	55±18

Характеристика Characteristic		№ ПП / No. of sampling site			
		1	2	3	4
N-NH ₄ , мг/кг mg/kg	A0	33,1±0,2	31±5	44,6±0,7	–
	A1	34,1±2,4	32,9±1,9	25,6±0,9	45±5
P ₂ O ₅ , мг/кг mg/kg	A0	16,6±0,7	54±50**	11,7±0,7	–
	A1	17±5	37±11	12,1±2,3	61,8±1,5
K ₂ O, мг/кг mg/kg	A0	46,4±0,7	143±130**	45,2±1,4	–
	A1	47,6±1,3	93±5	38,4±2,0	167±14

Примечание: горизонты: A0 – средняя проба, 0–5 см; A1 – средняя проба, 5–10 (15) см; * – данные приведены из расчёта средних между учётными площадками в 1 м² (n=5–10); ± – показывает стандартные отклонения; прочерк означает отсутствие сведений.

Notes: horizons: A0 – average sample, 0–5 cm; A1 – average sample, 5–10 (15) cm; * – data are based on the calculation of the average between the accounting sites in 1 m² (n=5–10); ± – shows the standard deviations; the dash means no information.

Таблица 2 / Table 2

Почвенные водоросли и цианопрокариоты исследованных травянистых сообществ
Soil algae and cyanoprokaryota of the studied herbaceous communities

Таксон Taxon	Число видов / Number of species			
	Степь / Steppe		Луг / Meadow	
	№ ПП / No. of sampling site			
	1	2	3	4
Cyanoprokaryota				
<i>Aphanocapsa muscicola</i> (Menegh.) Wille	1	1	1	1
Cf. <i>Chroococcopsis</i>	1	–	–	–
<i>Geitlerinema</i> sp.	1	1	1	1
Cf. <i>Funiculus sociatus</i> (Anagn.) Moreira-Fernandes et al.	1	1	1	1
<i>Jaaginema kuetszingianum</i> (Nägeli ex Gomont) Anagn. et Komárek	–	–	–	1
<i>Jaaginema</i> sp.	1	1	1	1
<i>Leptolyngbya foveolaria</i> (Gomont) Anagn. et Komárek	1	–	–	–
<i>Leptolyngbya nostocorum</i> (Bornet ex Gomont) Anagn. et Komárek	1	1	1	1
Cf. <i>Limnothrix</i>	–	–	–	1
<i>Lyngbya</i> sp.	1	–	–	–
<i>Microcoleus vaginatus</i> Gomont	1	1	1	1
<i>Nostoc</i> cf. <i>elliposporum</i> Rabenh. ex Bornet et Flahault	1	–	–	–
<i>Nostoc commune</i> Vaucher ex Bornet et Flahault	1	1	1	1
<i>Nostoc</i> sp.	–	–	–	1
<i>Oscillatoria</i> sp.	–	–	–	1
<i>Phormidium</i> sp.	1	1	1	1
<i>Pseudoanabaena</i> cf. <i>minima</i> (G.S.An) Anagn.	1	–	–	–
<i>Roholtiella</i> cf. <i>edaphica</i> Bohunická et Lukešová	–	–	–	1
<i>Schizothrix arenaria</i> Gomont	–	1	–	–
<i>Scytonema mirabile</i> Bornet	1	–	–	–
<i>Scytonema ocellatum</i> Lyngbye ex Bornet et Flahault	1	1	1	–
<i>Synechococcus</i> cf. <i>elongatus</i> (Nägeli) Nägeli	1	–	–	–
<i>Synechocystis</i> sp.	–	–	–	1
<i>Timaviella edaphica</i> (Elenkin) O.M. Vinogradova et Mikhailyuk	1	1	1	–
<i>Tolypothrix tenuis</i> Kütz. ex Bornet et Flahault	–	1	–	–
<i>Trichormus</i> sp.	–	–	–	1
Ochrophyta				
<i>Botrydiopsis</i> sp.	1	1	1	1
<i>Vischeria magna</i> (J.B.Petersen) Kryvenda et al.	1	1	1	1
<i>Xanthonema</i> cf. <i>montanum</i> (Visch.) Silva	1	1	1	–

Таксон Taxon	Число видов / Number of species			
	Степь / Steppe		Луг / Meadow	
	№ ПП / No. of sampling site			
	1	2	3	4
Bacillariophyta				
Cf. <i>Achnanthes</i>	1	1	1	1
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehrenb.) Grunow	1	1	1	1
Cf. <i>Navicula</i>	1	1	1	–
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenb.	1	1	1	–
Chlorophyta				
<i>Actinochloris terrestris</i> (Visch.) H.Ettl et G.Gärtner	1	1	1	1
<i>Bracteacoccus pseudominor</i> H.W.Bischoff et Bold	1	1	1	1
<i>Bracteacoccus</i> sp.	1	–	–	–
<i>Chlamydocapsa</i> sp.	1	1	1	1
<i>Chlamydomonas</i> sp.	1	–	–	–
<i>Chlorella vulgaris</i> Beij.	1	–	–	1
<i>Chlorococcum</i> sp.1	–	–	–	1
<i>Chlorococcum</i> sp.2	1	–	–	–
<i>Chloromonas augustae</i> (Skuja) T.Pröschold et al.	1	1	1	1
<i>Chlorosarcinopsis gelatinosa</i> Chantan. et H.C.Bold	1	1	1	1
<i>Chlorosarcinopsis</i> sp.	1	–	–	–
<i>Coccomyxa subglobosa</i> Pasher	1	–	–	–
<i>Coccomyxa</i> spp.	1	1	1	1
<i>Coelastrella</i> cf. <i>aeroterrestica</i> A.Tschaikner, G.Gärtner et W.Kofler	1	1	1	1
<i>Edaphochlorella mirabilis</i> (Andreeva) Darienko et Pröschold	–	1	1	1
<i>Fottea stichococcoides</i> Hindák	–	1	–	–
cf. <i>Heleochloris</i>	–	–	–	1
<i>Leptosira</i> sp.	1	1	1	1
<i>Macrochloris</i> sp.	1	1	1	–
<i>Microthamnion</i> cf. <i>strictissimum</i> Rabenh.	–	–	–	1
<i>Mychonastes homosphaera</i> (Skuja) Kalina et Punčoch.	1	–	–	–
<i>Myrmecia</i> sp.	1	–	–	–
<i>Neocystis</i> sp.	1	–	–	–
<i>Parietochloris alveolaris</i> (H.C.Bold) Shin Watan. et G.L.Floyd	1	1	1	1
<i>Protosiphon botryoides</i> (Kütz.) G.A.Klebs	–	–	–	1
<i>Pleurastrum sarcinoideum</i> Groover et Bold	1	1	1	1
<i>Pleurastrum</i> sp.	–	1	–	–
cf. <i>Pseudochlorella pringsheimii</i> (Shihira et Krauss) Darienko et al.	–	–	1	–
<i>Radiosphaera minuta</i> Herndon	1	1	1	1
<i>Scenedesmus</i> sp.	–	–	–	1
<i>Schizochlamydeella minutissima</i> Broady	1	–	–	–
<i>Scotinosphaera</i> cf. <i>gibberosa</i> (Voden. et Benderl.) Wujek et R.H.Thomps.	–	–	–	1
<i>Spongiochloris spongiosa</i> (Vischer) R.C.Starr	1	1	1	1
<i>Stichococcus minor</i> Nägeli	1	1	1	1
<i>Tetracystis</i> sp.	1	1	1	1
Charophyta				
<i>Interfilum terricola</i> (J.B.Petersen) Mikhailyuk et al.	–	1	–	–
<i>Klebsormidium</i> sp.	1	1	1	1
cf. <i>Streptosarcina</i>	–	1	–	–
Итого / In total: 71	50	40	35	42

Примечание: 1 – присутствие таксона, «–» – отсутствие. / Note: 1 – presence of taxon, “–” – absence of taxon.

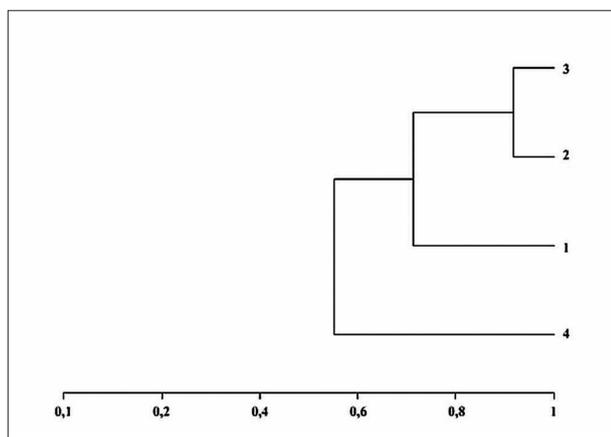


Рис. 2. Дендрограмма сходства альгокомплексов почв четырёх сравниваемых пробных площадок (ПП) окрестностей с. Большого Голоустного. По оси X – расстояние, ед.; по оси Y – № ПП
Fig. 2. Dendrogram of soil algaecomplexes similarity of the studied area. X-axis – distance, units; Y-axis – the number of SS

кариот свойственно почвам степей и лугов [18, 44–46]. На одной ПП находили от 35 до 50 видов (табл. 2). В почвах степей выявлено 58 видов, луга – 40. Наибольшее число водорослей в настоящее время найдено в горной степи, что, возможно, связано с влиянием лесных фитоценозов, контактирующих с горной степью. Наименьшее число видов обнаружено в почве настоящей степи на удалении от склона (ПП 3). В почвах ПП 4 присутствовали многочисленные мелкоклеточные диатомовые, которые нами в настоящей работе не были учтены. Дальнейшие исследования, на наш взгляд, расширят и уточнят представления о видовом богатстве водорослей почв исследуемой территории.

Цианопрокариоты занимают значительную долю в составе комплексов видов: от 29,4% для ПП 3, до 36,8% для ПП 4 (табл. 2). Макроколонии ностока обыкновенного в период исследований не встречались на ПП 4. На обнажённой сырой почве между кочками регистрировали небольшие субшаровидные (до 1 см в диаметре) колонии *Nostoc sp.* с красноватым оттенком. На рисунке 2 показаны результаты анализа сходства альгокомплексов изученных ПП, рассчитанные на основе коэффициента Чекановского-Съёренсена.

По видовому составу наиболее отличалась ПП 4 (рис. 2, табл. 2), здесь найдены виды, формирующие крупные талломы, предпочитающие повышенную влажность: *Microthamnion cf. strictissimum*, мелкоклеточные диатомовые, нитчатые и колониальные цианопрокариоты *Trichormus*, cf. *Limnothrix*,

Oscillatoria, *Synechocystis*, которые не находили в сухих почвах степей.

Альгокомплексам степных сообществ исследуемой территории свойственны черты таковых травянистых растительных сообществ аридных и семиаридных регионов Евразии, Северной Америки [18, 21, 29, 44–48]. Это – доминирование цианопрокариот в корочках водорослей на поверхности почвы и в составе эдафона наряду с зелёными водорослями. Поверхностные почвенные разрастания представлены тремя хорошо дифференцированными группами: колониальными нитчатыми гетероцитными цианопрокариотами с преобладанием *N. commune*; нитчатыми негетероцитными, жгутообразными, формирующими мощные пучки представителями *Microcoleus*, *Trichocoleus*, *Schizothrix*; тонкими нитчатыми негетероцитными цианопрокариотами, такими как *Leptolyngbya*.

Nostoc commune формирует на поверхности почвы в районе работ макроскопические колонии небольших размеров, по внешнему облику и внутреннему строению соответствующие описанию вида из сухих местообитаний [49]. Установлено, что относительное проективное покрытие видом на УП 1 м² не превышает 10%. Биомасса вида из года в год оставалась невысокой, достигала 2,0 г сухой массы на м² (рис. 3). Сопоставимые данные были получены в сухих и опустыненных степях Северного Казахстана и Тывы [36, 50].

Наибольшую биомассу ностока регистрировали в 2018 г., наименьшую – в 2021 г. Лето 2021 г. было наиболее холодным и влажным. В этот период выпало большее количество осадков в виде дождя в сравнении с 2014 и 2018 гг. [49]. Обилие и распределение осадков в течение лета и весны 2021 г. способствовало усиленному развитию травостоя, что несвойственно степям региона. Как правило, конец весны и начало лета – это засушливые периоды, отрицательно влияющие на развитие растений [33]. Несмотря на то, что в 2021 г. погодные условия характеризовались повышенной влажностью, этот период не был более благоприятным для развития макроскопических талломов *N. commune*, чем предыдущие. Обильные осадки вызывали образование поверхностного стока на горных склонах, что приводило к нарушению поверхностного слоя почвы и смыву колоний вида. На площадках, расположенных у подножия склона, усиленное развитие травостоя, в связи с этим, изменение экологических условий, также не способствовали развитию крупных талломов.

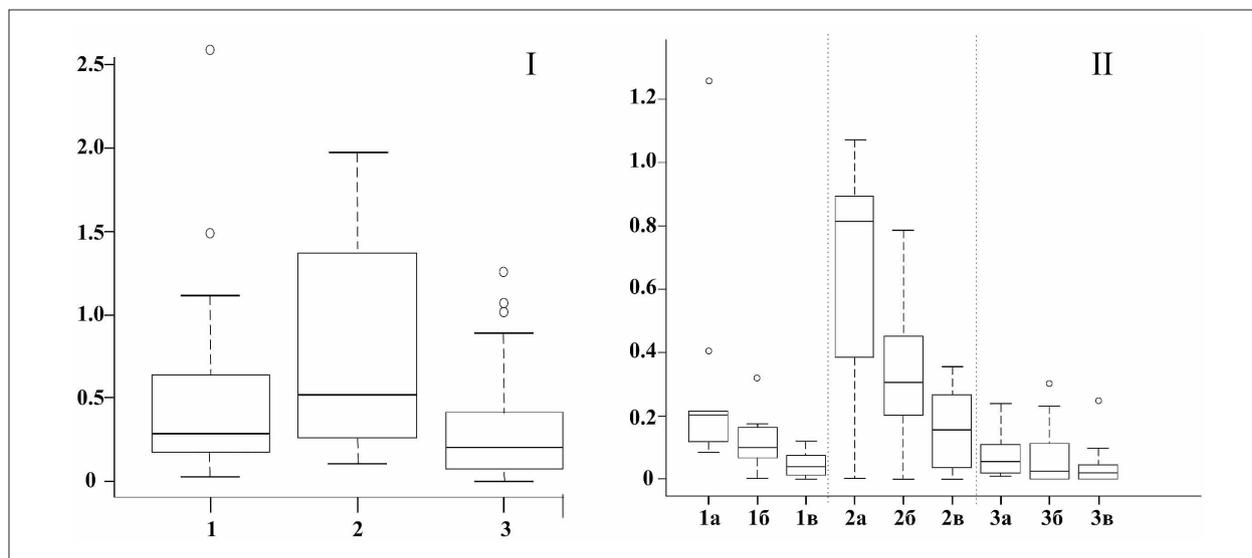


Рис. 3. Биомасса *Nostoc commune* в степных растительных сообществах: I – в разные годы, II – в разные месяцы одного года. По оси Y: сухая масса, г/м². По оси X: периоды измерений. I: 1 – июнь 2014 г.; 2 – июль 2018 г.; 3 – июль 2021 г.; II: 1, 2, 3 – № ПП; а – июль, б – август, в – сентябрь 2021 г.

Fig. 3. The biomass of *Nostoc commune* in steppe plant communities of the studied area: I – in different years, II – in different months of the same year. X-axis: measurement periods. Y-axis: dry mass, g/m². I: 1 – June 2014; 2 – July 2018, 3 – July 2021; II: 1, 2, 3 – No. SS; а – July, б – August, в – September 2021

Максимальные показатели массы *N. commune* обнаружены на ПП 2, расположенной у подножия склона в настоящей степи (рис. 3), наименьшие – на ПП 3. По физико-химическим свойствам почвы учётных площадок ПП 3 отличались от таковых ПП 1 и 2 (табл. 1). В целом, вид наращивал большую биомассу на участках, где почвы более плотные, сухие, менее пористые и хуже аэрированы. Для этих же ПП в верхних почвенных горизонтах установлено более высокое содержание Са и Mg. ПП 3 также можно отнести к наиболее подверженным антропогенному воздействию. Она расположена рядом с линией электропередач, вблизи просёлочной дороги. Проезжающий автотранспорт часто прокладывает путь не по наезженному дорожному полотну, а по степи, нарушая почвенно-растительный покров. Здесь более высокая пастбищная нагрузка по сравнению с другими ПП. В ряде работ отмечалось, что нарушение почвенно-растительного покрова может способствовать усилению развития *N. commune* [52, 53]. В степных сообществах окрестностей с. Большого Голоустного не было отмечено такого явления.

В 2021 г. нами были проведены исследования по изучению прироста биомассы вида в течение периода вегетации (рис. 3II). С этой целью раз в месяц в одни и те же сроки проводили отбор колоний ностока на ПП. Как видно из данных рисунка 3II, регулярное отчужде-

ние колоний отрицательно повлияло на скорость возобновления видом талломов макроскопических размеров. Сходные результаты были получены в исследованиях *N. commune* в засушливых степях Северного Казахстана и Башкирии [50, 54]. Иную динамику прироста биомассы вида регистрировали в некоторых сообществах степей Башкирского Предуралья, где прирост биомассы *N. commune* за месяц мог до 2 и более раз превысить предыдущие показатели [54]. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что образование ностоком макроколоний в травянистых сообществах окрестностей с. Большого Голоустного – достаточно длительный процесс.

Заключение

Проведённые исследования показали, что изученные в Байкальской котловине степные сообщества с заметным участием *N. commune* принадлежат к формациям горных и настоящих степей. Они функционируют на каштановых почвах, среднегумусных и среднесуглинистых, с высоким содержанием карбонатов, слабокислой до щелочной реакцией среды верхних горизонтов. Почвенно-растительный покров характеризуется высокой неоднородностью, что свойственно экосистемам горных регионов. По физико-химическим свойствам почвы степей значительно отличаются от почв

сырого луга, функционирующего вблизи исследованных сообществ. Найден 71 вид почвенных водорослей, среди которых преобладают цианопрокариоты и зелёные водоросли. Цианопрокариоты – группа, формирующая устойчивые поверхностные разрастания. В почвах степей выявлено 58 видов, луга – 40. Комплекс видов водорослей лугового сообщества значительно отличается от таковых степей, здесь присутствуют виды, требовательные к влажности. Альгокомплексы исследованных степных сообществ по составу сходны между собой. Биомасса макроскопических талломов *N. commune* из года в год невысокая, не превышает 2 г/м², что сопоставимо с известными данными для засушливых и опустыненных степей Казахстана и Тывы. Наиболее высокие показатели массы талломов вида отмечены на площадках, где почвы характеризовались высокой плотностью, как следствие, это более сухие, менее аэрированные и пористые почвы. Содержание элементов в почвах сильно варьировало, отмечено снижение концентраций Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ в верхних горизонтах почв степей по мере удаления от горного склона. Биомасса вида *N. commune* была меньшей на площадке, где содержание этих элементов было ниже. Показано, что регулярное отчуждение колоний данного вида отрицательно сказывается на его возобновлении. В условиях исследованных степей Байкальской котловины усиление антропогенного пресса на территорию может быть неблагоприятным фактором для развития макроколоний ностока.

Работа выполнена в рамках гос. задания СИФИБР СО РАН No. 122041100045-2.

Литература

1. Гаджиев И.М., Королюк А.Ю., Титлянова А.А., Андриевский В.С., Баяртогтох Б., Гришина Л.Г., Косых Н.П., Кыргыз Ч.О., Мироничева-Токарева Н.П., Романова И.П., Самбуу А.Д., Смелянский И.Э. Степи Центральной Азии. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 2002. 299 с.
2. Belelli Marchesini L., Papale D., Reichstein M., Vuichard N., Tchebakova N., Valentini R. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach // Biogeosciences. 2007. V. 4. No. 4. P. 581–595. doi: 10.5194/bg-4-581-2007
3. Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security // BioScience. 2010. V. 60. No. 9. P. 708–721. doi: 10.1525/bio.2010.60.9.8
4. Smelansky I.E., Tishkov A.A. The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges // Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World. Plant and Vegetation / Eds. M. Werger, M. van Staalduinen. V. 6. Dordrecht: Springer, 2012. P. 45–101. doi: 10.1007/978-94-007-3886-7_2
5. Merbold L., Eugster W., Stieger J., Zahniser M., Nelson D., Buchmann N. Greenhouse gas budget (CO₂, CH₄ and N₂O) of intensively managed grassland following restoration // Glob. Chang. Biol. 2014. V. 20. No. 6. P. 1913–1928. doi: 10.1111/gcb.12518
6. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н.В., Тишков А.А., Ти Т., Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с. doi: 10.31251/978-5-600-02350-5
7. Hurka H., Friesen N., Bernhardt K.-G., Neuffer B., Smirnov S.V., Shmakov A.I., Blattner F.R. The Eurasian steppe belt: Status quo, origin and evolutionary history // Turczaninowia. 2019. V. 22. No. 3. P. 5–71. doi: 10.14258/turczaninowia.22.3.1
8. Плешанов А.С., Плешанова Г.И., Шаманова С.И. Ландшафтно-климатические закономерности пространственного размещения рефугиев в Байкальском регионе // Сибирский экологический журнал. 2002. № 5. С. 603–610.
9. Рябцев В.В., Турута А.Е. Степные экосистемы в Прибайкальском национальном парке // Степной бюллетень. 2000. № 8. С. 11–14.
10. Valkó O., Zmihorski M., Biurrun I., Loos J., Labadessa R., Venn S. Ecology and conservation of steppes and semi-natural grasslands // Hacquetia. 2016. V. 15. No. 2. P. 5–14. doi: 10.1515/hacq-2016-0021
11. Пешкова Г.А. Растительность Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1985. 145 с.
12. Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука, 1984. 265 с.
13. Намзалов Б.Б. Степи Южной Сибири. Новосибирск; Улан-Удэ, 2002. 304 с.
14. Намзалов Б.Б. К вопросу о реликтах во флоре и растительности степных экосистем Байкальской Сибири // Растительный мир Азиатской России. 2012. № 2 (10). С. 94–100.
15. Надеждин Б.В. Лено-Ангарская лесостепь (почвенно-географический очерк). М.: Изд-во АН СССР, 1961. 328 с.
16. Yang A., Liu N., Tian Q., Bai W., Williams M., Wang Q., Li L., Zhang W.H. Rhizosphere bacterial communities of dominant steppe plants shift in response to a gradient of simulated nitrogen deposition // Front. Microbiol. 2015. V. 6. Article No. 789. 10.3389/fmicb.2015.00789

17. Ma X., Ren B., Yu J., Wang J., Bai L., Li J., Li D., Meng M. Changes in grassland soil types lead to different characteristics of bacterial and fungal communities in Northwest Liaoning, China // *Front. Microbiol.* 2023. V. 14. Article No. 1205574. doi: 10.3389/fmicb.2023.1205574
18. Сдобникова Н.В. К характеристике систематического состава водорослей такыров северной части Туранской низменности // *Ботанический журнал.* 1958. Т. 43. № 12. С. 1675–1681.
19. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Kondakova I.A. Specific character of soil “bloomings” in agricultural and urbanized territories // *Theoretical and Applied Ecology.* 2018. No. 3. P. 78–85. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-078-085
20. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Пегушина О.А., Фокина А.И. Биооплёнки *Nostoc commune* – особая микробная сфера // *Теоретическая и прикладная экология.* 2007. № 1. С. 15–19.
21. Biological soil crusts: An organizing principle in drylands / Eds. B. Weber, B. Büdel, J. Belnap. Cham: Springer, 2016. 543 p. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0
22. Warren S.D., Rosentreter R., Pietrasiak N. Biological soil crusts of the Great Plains: a review // *Rangeland Ecol. Manage.* 2021. V. 78. P. 213–219. doi: 10.1016/j.rama.2020.08.010
23. Wang Q., Han Y., Lan S., Hu C. Metagenomic insight into patterns and mechanism of nitrogen cycle during biocrust succession // *Front. Microbiol.* 2021. V. 12. Article No. 633428. doi: 10.3389/fmicb.2021.633428
24. Grote E.E., Belnap J., Housman D.C., Sparks J.P. Carbon exchange in biological soil crusts communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change // *Global Change Biol.* 2010. V. 16. No. 10. P. 2763–2774. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02201.x
25. Судакова Е.А. Водоросли целинных и пахотных дерново-лесных почв правобережной Ангары // *Почвы юга Средней Сибири и их использование.* Иркутск: ИГУ, 1970. С. 60–64.
26. Судакова Е.А. Почвенные водоросли луговых биогеоценозов // *Экология лугов западного участка зоны БАМ.* Новосибирск: Наука, 1986. С. 35–44.
27. Андреева В.М., Сдобникова Н.В. О почвенных водорослях степных районов Прибайкалья // *Новости систематики низших растений.* 1975. Т. 12. С. 81–88.
28. Перминова Г.Н., Гутишвили И.С., Китаев Е.В. Почвенные водоросли фитоценозов Байкальского заповедника // *Водоросли, лишайники, грибы и мохообразные в заповедниках РСФСР: сборник научных трудов ЦНИЛ РСФСР.* Москва, 1985. С. 17–26.
29. Новичкова-Иванова Л.Н. Почвенные водоросли фитоценозов Сахаро-Гобийской пустынной области. Л.: Наука, 1980. 255 с.
30. Егорова И.Н., Шамбуева Г.С., Шергина О.В., Шинэн Н. К экологии *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) из Южной Сибири и Монголии // *Сибирский лесной журнал.* 2019. № 1. С. 16–29. doi: 10.15372/SJFS20190402
31. Атлас Иркутской области / Отв. ред. И.П. Заруцкая. М.; Иркутск: ГУГК, 1962. 182 с.
32. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Л.: Гидрометеоздат, 1991. Ч. 1–6. Вып. 22. 606 с.
33. Каргушин В.М. Агроклиматические ресурсы юга Восточной Сибири. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1969. 99 с.
34. Атутова Ж.В. Природные и антропогенные факторы развития геосистем бассейна реки Голоустной (Прибайкалье) // *География и природные ресурсы.* 2008. № 2. С. 85–93.
35. Штина Э.А. Методы изучения почвенных водорослей. Киров: Кировский с.-хоз. ин-т, 1981. 34 с.
36. Шушуева М.Г. Почвенные водоросли степных сообществ Тувы // *Степная растительность Сибири и некоторые черты её экологии.* Новосибирск: Наука, 1982. С. 121–129.
37. Кузяхметов Г.Г. Методические указания по изучению почвенных водорослей. Уфа: Башкир. гос. ун-т, 1986. 32 с.
38. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1962. 491 с.
39. Классификация и диагностика почв СССР / Сост. В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.И. Розов, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 223 с.
40. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронный ресурс] <https://egrpr.esoil.ru/> (Дата обращения: 14.09.2023).
41. Егорова И.Н., Судакова Е.А., Максимова Е.Н., Тупикова Г.С. Наземные водоросли гор Южной Сибири и Северной Монголии // *Ботанический журнал.* 2020. Т. 105. № 2. С. 107–132. doi: 10.31857/S0006813620020027
42. Новаковский А.Б. Взаимодействие Excel и статистического пакета R для обработки данных в экологии // *Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН.* 2016. № 3. С. 26–33. doi: 10.31140/j.vestnikib.2016.3(197).4
43. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М. Биопродуктивность сенокосов и пастбищ сухостепной зоны Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. науч. центра СО РАН, 2006. 514 с.
44. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
45. Пивоварова Ж.Ф. Особенности флористического состава и фитоценотической организации водорослевых группировок горных степей Северо-Восточной Азии // *Ботанический журнал.* 1986. Т. 71. № 4. С. 521–527.
46. Кузяхметов Г.Г. Водоросли зональных почв степи и лесостепи. Уфа: РИО БашГУ, 2006. 284 с.
47. Garcia-Pichel F., Loza V., Marusenko Y., Mateo P., Potrafka R.M. Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities // *Science.* 2013. V. 340. No. 6140. P. 1574–1577. doi: 10.1126/science.1236404
48. Roncero-Ramos B., Muñoz-Martín M.A., Chamizo S., Fernández-Valbuena L., Mendoza D., Perona E., Cantón Y., Mateo P. Polyphasic evaluation of key cyanobacteria in

biocrusts from the most arid region in Europe // PeerJ. 2019. V. 7. Article No. e6169. doi: 10.7717/peerj.6169

49. Еленкин А.А. Сине-зеленые водоросли СССР. Вып. I. Специальная (систематическая) часть. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1938. 984 с.

50. Шушуева М.Г. Динамика биомассы почвенных водорослей в степных биогеоценозах // Почвоведение. 1984. № 8. С. 111–116.

51. Метеорологический ежегодник. Вып. 22. Иркутск: ФГБУ Иркутское УГМС, 2022. 31 с.

52. Лавренко Е.М. Степи СССР // Растительность СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 2. 576 с.

53. Дубовик И.Е., Киреева Н.А., Закирова З.Р., Климина И.П. Макроскопические разрастания водорослей и сопутствующие им микромицеты // Альгология. 2008. Т. 18. № 1. С. 51–58.

54. Кузяхметов Г.Г. Продукция ностока обыкновенного (*Nostoc commune* Vauch.) в степных сообществах и её связь с условиями местообитания // Научное обозрение. Биологические науки. 1989. № 12. С. 45–46.

References

1. Gadzhiev I.M., Korolyuk A.Yu., Tytlyanova A.A., Andrievsky V.S., Bayartogtozh B., Grishina L.G., Kosykh N.P., Kyrgys Ch.O., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P., Sambuu A.D., Smelyansky I.E. Steppes of Inner Asia. Novosibirsk: Novosibirskoe otdelenie izdatelstva “Nauka”, 2002. 299 p. (in Russian).

2. Belelli Marchesini L., Papale D., Reichstein M., Vuichard N., Tchebakova N., Valentini R. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach // Biogeosciences. 2007. V. 4. No. 4. P. 581–595. doi: 10.5194/bg-4-581-2007.

3. Lal R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security // BioScience. 2010. V. 60. No. 9. P. 708–721. doi: 10.1525/bio.2010.60.9.8

4. Smelansky I.E., Tishkov A.A. The Steppe Biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges // Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World. Plant and Vegetation / Eds. M. Werger, M. van Staaldunin. V. 6. Dordrecht: Springer, 2012. doi: 10.1007/978-94-007-3886-7_2

5. Merbold L., Eugster W., Stieger J., Zahniser M., Nelson D., Buchmann N. Greenhouse gas budget (CO₂, CH₄ and N₂O) of intensively managed grassland following restoration // Glob. Chang. Biol. 2014. V. 20. No. 6. P. 1913–1928. doi: 10.1111/gcb.12518

6. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefedyeva L.G., Semenyuk N.V., Tishkov A.A., Ti T., Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features. Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2018. 110 p. (in Russian). doi: 10.31251/978-5-600-02350-5

7. Hurka H., Friesen N., Bernhardt K.-G., Neuffer B., Smirnov S.V., Shmakov A.I., Blattner F.R. The Eurasian steppe belt: Status quo, origin and evolutionary history // Turczaninowia. 2019. V. 22. No. 3. P. 5–71. doi: 10.14258/turczaninowia.22.3.1

8. Pleshanov A.S., Pleshanova G.I., Shamanova S.I. Landscape-climatic patterns of spatial distribution of refugia in the Baikal region // Contemporary Problems of Ecology. 2002. No. 5. P. 603–610 (in Russian).

9. Ryabtsev V.V., Turuta A.E. Steppe ecosystems in the Baikal National Park // Stepnoy byulleten. 2000. No. 8. P. 11–14 (in Russian).

10. Valkó O., Zmihorski M., Biurrun I., Loos J., Labadessa R., Venn S. Ecology and conservation of steppes and semi-natural grasslands // Hacquetia. 2016. V. 15. No. 2. P. 5–14. doi: 10.1515/hacq-2016-0021

11. Peshkova G.A. Vegetation of Siberia (Cis-Baikal and Transbaikal region). Novosibirsk: Nauka, 1985. 145 p. (in Russian).

12. Malyshev L.I., Peshkova G.A. Features and genesis of the flora of Siberia (Cis-Baikal and Transbaikal region). Novosibirsk: Nauka, 1984. 265 p. (in Russian).

13. Namzalov B.B. The steppes of the southern Siberia. Novosibirsk; Ulan-Ude, 2002. 304 p. (in Russian).

14. Namzalov B.B. For questions about of relict in the flora and vegetation of steppe ecosystems of the Baikal Siberia // Flora and Vegetation of Asian Russia. 2012. No. 2. P. 94–100 (in Russian).

15. Nadezhdin B.B. Leno-Angarsk forest-steppe (soil-geographical essay). Moskva: USSR AS Publisher, 1961. 328 p. (in Russian).

16. Yang A., Liu N., Tian Q., Bai W., Williams M., Wang Q., Li L., Zhang W.H. Rhizosphere bacterial communities of dominant steppe plants shift in response to a gradient of simulated nitrogen deposition // Front. Microbiol. 2015. V. 6. Article No. 789. doi: 10.3389/fmicb.2015.00789

17. Ma X., Ren B., Yu J., Wang J., Bai L., Li J., Li D., Meng M. Changes in grassland soil types lead to different characteristics of bacterial and fungal communities in Northwest Liaoning, China // Front. Microbiol. 2023. V. 14. Article No. 1205574. doi: 10.3389/fmicb.2023.1205574

18. Sdobnikova N.V. On the algal flora of the takyrs in the northern part of the Turansk plain // Botanichesky zhurnal. 1958. V. 43. No. 12. P. 1675–1681 (in Russian).

19. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Kondakova I.A. Specific character of soil “blooming” in agricultural and urbanized territories // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 78–85. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-078-085

20. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Pegushina O.A., Fokina A.I. *Nostoc commune* biofilms as a special microbiota sphere // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 1. P. 15–19 (in Russian).

21. Biological soil crusts: An organizing principle in drylands / Eds. B. Weber, B. Büdel, J. Belnap. Cham: Springer, 2016. 543 p. doi: 10.1007/978-3-319-30214-0

22. Warren S.D., Rosentreter R., Pietrasiak N. Biological soil crusts of the Great Plains: a review // *Rangeland Ecol. Manage.* 2021. V. 78. P. 213–219. doi: 10.1016/j.rama.2020.08.010
23. Wang Q., Han Y., Lan S., Hu C. Metagenomic insight into patterns and mechanism of nitrogen cycle during biocrust succession // *Front. Microbiol.* 2021. V. 12. Article No. 633428. doi: 10.3389/fmicb.2021.633428
24. Grote E.E., Belnap J., Housman D.C., Sparks J.P. Carbon exchange in biological soil crusts communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change // *Global Change Biol.* 2010. V. 16. No. 10. P. 2763–2774. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02201.x
25. Sudakova E.A. Algae of virgin and arable sod-forest soils of the right bank of the Angara River // *Soils of the south of Central Siberia and their utilization.* Irkutsk: ISU, 1970. P. 60–64 (in Russian).
26. Sudakova E.A. Soil algae of meadow biogeocenoses // *Ecology of meadows of the western section of the BAM zone.* Novosibirsk: Nauka, 1986. P. 35–44 (in Russian).
27. Andreeva V.M., Sdobnikova N.V. About the soil algae of the Baikal steppes // *Novosti sistematiki nizshikh rasteniy.* 1975. V. 12. P. 81–88 (in Russian).
28. Perminova G.N., Gutishvili I.S., Kitayev E.V. Soil algae of the Baikal reserve phytocenoses // *Algae, lichens, fungus and mosses in nature reserves of RSFSR: Collection of scientific papers.* Moskva, 1985. P. 17–26 (in Russian).
29. Novichkova-Ivanova L.N. Soil algae of the Sahara-Gobi desert region phytocenoses. Leningrad: Nauka, 1980. 255 p. (in Russian).
30. Egorova I.N., Shambueva G.S., Shergina O.V., Shinen N. On the ecology of *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) in Southern Siberia and Mongolia // *Sibirskij Lesnoj Zurnal.* 2019. No. 1. P. 16–29 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20190102
31. Atlas of the Irkutsk region / Ed. I.P. Zarutskaya. Moskva; Irkutsk: GUGK, 1962. 182 p. (in Russian).
32. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Ser. 3. Long-term data. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. Pt. 1–6. No. 22. 606 p. (in Russian).
33. Kartushin V.M. Agro-climatic resources of the south of Eastern Siberia. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoe knizhnoe izdatelstvo, 1969. 99 p. (in Russian).
34. Atutova Zh.V. Natural and anthropogenic factors of geosystem evolution in the Goloustnaya River basin (Baikal region) // *Geography and Natural Resources.* 2008. No. 2. P. 85–92 (in Russian).
35. Shtina E.A. Methods of studying of soil algae. Kirov: Izd-vo Kirovskogo selskokhozyaystvennogo instituta, 1981. 34 p. (in Russian).
36. Shushuyeva M.G. Soil algae of Tuva steppe communities // *Steppe vegetation of Siberia and some features of its ecology.* Novosibirsk: Nauka, 1982. P. 121–129 (in Russian).
37. Kuzyakhmetov G.G. Guidelines for the study of soil algae. Ufa: Bashkirskiy gosudarstvennyy universitet, 1986. 32 p. (in Russian).
38. Arinushkina Ye.V. Manual of chemical analysis of soils. Moskva: MSU Publisher, 1962. 491 p. (in Russian).
39. Classification and diagnostics of the USSR soils / Eds. V.V. Egorov, V.M. Fridland, E.N. Ivanova, N.I. Rozov, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moskva: Kolos, 1977. 223 p. (in Russian).
40. Unified State Register of Soil Resources of Russia [Internet resource] <http://egprp.esoil.ru/> (Accessed: 14.09.2023) (in Russian).
41. Egorova I.N., Sudakova E.A., Maksimova E.N., Tupikova G.S. Terrestrial Algae of the mountains of South Siberia and North Mongolia // *Botanicheskyy zhurnal.* 2020. V. 105. No. 2. P. 107–132 (in Russian). doi: 10.31857/S0006813620020027
42. Novakovskiy A.B. Interaction between Excel and Statistical package R for ecological data analysis // *Vestnik IB Komi NC UrO RAN.* 2016. No. 3. P. 26–33 (in Russian). doi: 10.31140/j.vestnikib.2016.3(197).4
43. Merkusheva M.G., Ubugunov L.L., Korsunov B.M. Bioproductivity of hayfields and pastures of Transbaikalian dry steppe zone. Ulan-Ude: Izdatelstvo Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN, 2006. 514 p. (in Russian).
44. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).
45. Pivovarov Zh.F. The distinctive features of the floristic composition and phytocoenotical organization of algal groupings of North-East Asia mountain steppes // *Botanicheskyy zhurnal.* 1986. V. 71. No. 4. P. 521–527 (in Russian).
46. Kuzyakhmetov G.G. Algae of the steppe and forest-steppe zonal soils. Ufa: RIO BashGU, 2006. 284 p. (in Russian).
47. Garcia-Pichel F., Loza V., Marusenko Y., Mateo P., Potrafka R.M. Temperature drives the continental-scale distribution of key microbes in topsoil communities // *Science.* 2013. V. 340. No. 6140. P. 1574–1577. doi: 10.1126/science.1236404
48. Roncero-Ramos B., Muñoz-Martín M.Á., Chamizo S., Fernández-Valbuena L., Mendoza D., Perona E., Cantón Y., Mateo P. Polyphasic evaluation of key cyanobacteria in biocrusts from the most arid region in Europe // *PeerJ.* 2019. V. 7. P. e6169. doi: 10.7717/peerj.6169
49. Elenkin A.A. Blue-green algae of the USSR. No. 1. Special part (Taxonomy). Moskva; Leningrad: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR, 1938. 984 p. (in Russian).
50. Shushuyeva M.G. Dynamics of soil algae biomass in steppe biogeocoenoses // *Pochvovedenie.* 1984. No. 8. P. 111–116 (in Russian).
51. Meteorological Yearbook. V. 22. Irkutsk: FGBU Irkutskoe UGMS, 2022. 34 p. (in Russian).
52. Lavrenko E.M. Steppes of USSR // *Vegetatio URSS.* V. II. Moskva; Leningrad: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR, 1940. 576 p. (in Russian).
53. Dubovik I.E., Kireeva N.A., Zakirova Z.R., Klimina I.P. Macroscopic algal growths and concomitant micromycetes // *Algologia.* 2008. V. 18. No. 1. P. 51–58 (in Russian).
54. Kuzyakhmetov G.G. The *Nostoc commune* Vauch. production in steppe communities and its relation to habitat conditions // *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki.* 1989. No. 12. P. 45–46 (in Russian).

Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22 и его способности разлагать полиэтилен

© 2024. А. А. Широких^{1,2}, д. б. н., профессор,
И. Г. Широких^{1,2,3}, д. б. н., профессор, в. н. с.,

¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

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: irgenal@mail.ru

Широко распространённый и обладающий обширным биотехнологическим потенциалом ксилотрофный базидиомицет *Schizophyllum commune* Fr. характеризуется значительной генетической вариабельностью, что актуализирует исследование различных штаммов этого гриба для решения комплекса экологических проблем, связанных, в числе прочих, с утилизацией пластиковых отходов. Использованный в работе штамм *S. commune* EO22 изолирован с гниющей древесины *Acer negundo* в подзоне южной тайги европейского Северо-Востока (58°35' с. ш., 49°69' в. д., окрестности г. Кирова) и поддерживается в мицелиальной культуре в лабораторных условиях. Видовая идентификация выполнена на основании морфологии и результата секвенирования нуклеотидной последовательности фрагмента ITS1–5.8S–ITS2. Описаны особенности роста и плодообразования грибной культуры EO22 на плотных средах. В эксперименте по культивированию мицелия *S. commune* EO22 совместно с полиэтиленовой плёнкой низкого давления (ПНД) – одного из самых распространённых (64% от общего объёма производства пластиков) загрязнителей окружающей среды, установлен деградативный потенциал штамма. Процесс биодegradации ПНД осуществлялся мицелием исключительно дикариотического типа и сопровождался формированием плодовых тел гриба, что представляет интерес в связи с развитием технологий получения пищевого белка в процессе утилизации пластиковых отходов.

Ключевые слова: пластиковые отходы, полиэтилен, биодegradация, базидиомицеты.

Characteristics of the *Schizophyllum commune* new strain EO22 and its ability to degrade polyethylene

© 2024 A. A. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-7808-0376[†]

I. G. Shirokikh^{1,2,3} ORCID: 0000-0002-3319-2729[†]

¹Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: irgenal@mail.ru

The widespread and possessing extensive biotechnological potential xylo-trophic basidiomycete *Schizophyllum commune* Fr. has a significant genetic variability. This actualizes the study of the fungus various strains to solve a complex of environmental problems, in particular, the disposal of plastic waste. The *S. commune* strain EO22 used in the work was isolated from rotting *Acer negundo* wood in the southern taiga subzone of the European Northeast (N58°35', E49°69', vicinity of Kirov). It is maintained in mycelial culture in laboratory conditions. The species identification was performed

based on the morphology and sequencing result of the ITS1–5.8S–ITS2 fragment nucleotide sequence. The features of the growth and fruiting of mycelial culture EO22 on potato-sucrose and malt agar are described. The degradation potential of the *S. commune* strain EO22 was established in the experiment on co-incubation with low-pressure polyethylene (HDPE) film. HDPE is one of the most common environmental pollutants (64% of the total plastics production). The process of HDPE biodegradation was carried out exclusively by the dikaryotic type of mycelium and was accompanied by the forming of the fungus fruiting bodies. The results obtained are of interest in connection with the development of technologies for food protein production in the process of plastic waste utilization.

Keywords: plastic waste, polyethylene, biodegradation, basidiomycetes.

Щелелистник обыкновенный (*Schizophyllum commune* Fr.) – широко распространённый на всех континентах, кроме Антарктиды, ксилотрофный базидиомицет, вызывающий белую гниль древесины. Многие авторы отмечают биотехнологическую универсальность шизофиллума. Вид способен синтезировать широкий спектр хозяйственно ценных метаболитов, таких как лигноцеллюлолитические ферменты, шизофиллан, этанол, биосурфактанты [1]. В составе *S. commune* обнаружены фенольные и терпеноидные соединения, эргостерин, а также несколько веществ, обладающих антиоксидантными свойствами: гидроксibenзойная кислота, протокатехиновая кислота и токоферол. Сообщалось, что *S. commune* продуцирует липазу, фитазу, литические полисахаридмонооксигеназы и белки-экспансины, повышающие доступность полисахаридов [2, 3], иминолактоны, способные подавлять рост раковых клеток [3, 4].

Наиболее известный полисахарид шизофиллума – шизофиллан, демонстрирует сразу несколько биологических активностей: иммуномодулирующую, противоопухолевую, противовоспалительную и антиоксидантную [5, 6]. В странах Африки и Азии кожистые плодовые тела *S. commune* считаются съедобными, их используют в пищу и для изготовления лекарственных средств [7, 8]. Значительный метаболический потенциал *S. commune* является базисом к широкому спектру его применения в здравоохранении, переработке лигноцеллюлозного сырья для производства биоэтанола, экобиотехнологиях [9].

Среди глобальных экологических проблем на первый план в последнее время выходит загрязнение окружающей среды (ОС) отходами пластических масс, накопление которых увеличивается с каждым годом. В повседневной жизни в качестве пластика в основном используется полиэтилен высокого (ПВД) и низкого (ПНД) давления. На долю полиэтилена приходится 64% от общего объёма производства синтетических пластмасс [10]. Полиэтилен низкого давления используется для производства бутылок, пластиковых пакетов,

полиэтиленовой плёнки, упаковочных материалов, одноразовых изделий, контейнеров для мусора, водопроводных труб и т. д. Использование полиэтилена во всём мире ежегодно увеличивается на 12% [11].

Многие лигноцеллюлитические ферменты (лигнинпероксидазы, Mn-пероксидазы, полифункциональные пероксидазы, лакказы), обладают широкой субстратной специфичностью, что позволяет им разлагать не только органические вещества природного происхождения, но и синтетические полимеры [12]. Несмотря на то, что пластики по структуре существенно отличаются от лигноцеллюлозы и обладают большей устойчивостью к биodeградации, между этими классами соединений существует очевидное сходство, поскольку те и другие представляют собой смеси гидрофобных полимеров с аморфными и кристаллическими участками, деградация которых осуществляется с участием гидролаз и оксидоредуктаз [13]. Рядом авторов была установлена связь между лигнолитической активностью грибов белой гнили и деградацией полиэтилена [14, 15], которая происходила с помощью внеклеточных лакказ, расщепляющих сложные полимеры до короткоцепочечных или более мелких молекул, способных к мембранному транспорту [16]. По сравнению с лакказами растений и бактерий, грибные лакказы обладают более высоким окислительно-восстановительным потенциалом и разнообразными каталитическими свойствами. В настоящее время грибные лакказы рассматриваются как многофункциональные биокатализаторы, способные разрушать полиэтилен и обесцвечивать промышленные красители [17, 18].

Schizophyllum commune – первый из базидиальных грибов, для которого в 2010 г. было осуществлено полногеномное секвенирование [19]. Результаты показали, что шизофиллум обладает потенциалом разрушения всех компонентов лигноцеллюлозной биомассы, поскольку в его геноме закодированы 366 углеводов-активных ферментов (Carbohydrate-Active enZYmes – CAZy) из имеющихся в базе данных CAZy (<http://www.cazy.org/>). Благо-

даря обширному набору ферментов, разрушающих и модифицирующих клеточную стенку растений, *S. commune* представляется одним из лучших кандидатов для использования не только в промышленных процессах (производство биоэтанола из лигноцеллюлозного сырья, биоконверсия побочных продуктов сельского хозяйства), но и в биодegradации ксенобиотиков и загрязняющих веществ.

Исследование различных штаммов *S. commune*, их метаболизма и ферментного аппарата могут послужить основой для создания природоподобной технологии переработки пластиковых отходов, что позволит приблизиться к решению комплекса экологических проблем, связанных с пластиковым загрязнением.

Целью работы являлось изучение культурально-морфологических свойств природного изолята *Schizophyllum commune* EO22 и его влияния на биодegradацию полиэтилена в условиях двухфазной культуры.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил штамм *S. commune* EO22, выделенный в мицелиальную культуру на агаризированном пивном сусле (4° Баллинга) с гниющей древесины клёна ясенелистного (*Acer negundo* L.). Образец древесины был отобран в весенний период в подзоне южной тайги европейского Северо-Востока (58°35'59" с. ш., 49°69'00" в. д., окрестность г. Кирова). Видовую идентификацию проводили с использованием морфологических признаков плодового тела гриба (<http://www.indexfungorum.org/Names/NamesRecord.asp?RecordID=208403>), а также на основании результата секвенирования в ООО «Синтол» (г. Москва) нуклеотидной последовательности фрагмента ITS1–5.8S–ITS2. Идентификацию секвенированной последовательности осуществляли с применением геномной и программной базы BLAST (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>). Для описания культуральных и морфологических свойств культуры гриба его выращивали на картофельно-сахарозном и солодовом агаре [20] при комнатной температуре (20±2 °C) и естественном освещении. Особенности роста и плодообразования культуры EO22 на плотных средах отмечали на 10 и 20 сут роста. Чашки с мицелиальными культурами просматривали под микроскопом Leica DM 2500 при увеличении ×200 и ×400.

В эксперименте по изучению способности штамма разлагать ПНД гриб выращивали

в двухфазной культуре (твёрдый субстрат/жидкость). Прекультивацию гриба проводили на агаризированном пивном сусле при 22 °C в течение 7 сут до появления сплошного газона. Из ПНД-плёнки толщиной 22 мкм вырезали полоски площадью 20×90 мм, взвешивали, фиксировали их массу, стерилизовали в 70% этаноле в течение 2 ч, затем трижды промывали стерильной дистиллированной водой и асептически размещали в чашках Петри (диаметром 9 см), содержащих каждая по 25 мл жидкой среды Чапека [20], по одной на поверхности среды. На каждую полоску в опытном варианте помещали по три агаровых блока с мицелием гриба, которые вырезали из мицелиального газона пробочным сверлом диаметром 8 мм. В контроле гриб на полоски не наносили. Всего закладывали по 9 полосок в опытном и контрольном вариантах. Чашки с полосками ПНД инкубировали при 20±2 °C в течение 60 сут. После инкубации с грибом полоски механически очищали от биомассы гриба, промывали 70% этанолом для удаления остатков мицелия, трижды промывали стерильной дистиллированной водой и высушивали на воздухе с последующим досушиванием в эксикаторе над силикагелем в течение 24 ч. Массу полосок ПНД после инкубации с грибом и без гриба определяли гравиметрически. Далее полоски микроскопировали для сравнения с контролем и выявления возможных повреждений. Видеофиксацию изображений осуществляли с помощью системы Image Scope M.

Обработку результатов осуществляли методами непараметрической статистики [21]. Значимость различий между вариантами оценивали с помощью T-критерия Вилкоксона (уровень значимости $p=0,01$).

Результаты и обсуждение

В природе *S. commune* формирует веерообразные плодовые тела размером 1–6 см, пластинчатой структуры, от беловато-серых до розовато-бежевых, ворсистые, без ножки или с короткой напоминающей ножку структурой (рис. 1а, б, см. цв. вкладку VI). Плодовые тела часто расположены на субстрате группами, расщеплены продольно на две части и скручиваются при недостатке влаги, чтобы защитить споры на спорообразующем слое – гимении. При наступлении благоприятных условий они способны к регидратации и выделению базидиоспор, которые образуются на базидиях. Каждая базидия содержит 4 цилиндриче-

ские базидиоспоры, размером 3–4×1–1,5 мкм, с гладкими стенками и боковым рубцом на нижнем конце.

Из базидиоспоры гриба, собранного с гниющей древесины клёна ясенелистного, и соответствующего по морфологии приведённому выше описанию, была получена на солодовом агаре мицелиальная культура *S. commune* – штамм EO22. При культивировании на картофельно-сахарозном (рис. 1с, см. цв. вкладку VI) и солодовом агаре (рис. 1d, см. цв. вкладку VI) колонии гриба, от белого до бледно-розовато-серого цвета, разрастались, становились шерстистыми, и вскоре образовывали макроскопически видимые базидиокарпы (плодовые тела) – сидячие, почковидные, лопастные, с «пластинками», радиально расходящимися от точки прикрепления (рис. 1е, см. цв. вкладку VI). Базидиокарпы с расщеплёнными пластинками – наиболее характерная особенность этого вида (рис. 1f, см. цв. вкладку VI).

При микроскопировании колоний наблюдали гиалиновые (бесцветные, полупрозрачные) гифы (рис. 2а, см. цв. вкладку VII), часто с боковыми выростами, или спикулами (шипиками) (рис. 2b, см. цв. вкладку VII), что характерно для монокариотического мицелия, не способного к формированию базидиокарпов.

Образование плодовых тел у *S. commune* происходит после дикаризации (рис. 2b, см. цв. вкладку VII) и инициируется агрегацией воздушных гифов дикариотического мицелия (рис. 2с, см. цв. вкладку VII). Эти агрегаты образуют зачатки плодовых тел, которые в дальнейшем развиваются в зрелые базидиокарпы. Кариогамия и мейоз происходят в базидиях зрелого плодового тела, и образующиеся

в результате базидиоспоры могут давать начало новому монокариотическому мицелию. Дикариотический мицелий, способный давать базидиокарпы, отличался наличием пряжек у большинства септ (рис. 2d, см. цв. вкладку VII).

Молекулярная идентификация культуры гриба на основе результатов секвенирования региона, включающего внутренний транскрибируемый спейсер (Internal transcribed spacer) ITS1, ген 5.8S рРНК и ITS2, подтвердила, что природный изолят EO22 является представителем вида *Schizophyllum commune* Fr., семейства Schizophyllaceae, порядка Agaricales, класса Agaricomycetes, отдела Basidiomycota.

Известны примеры, когда при культивировании грибов белой гнили с пластмассами наблюдали деполимеризацию и/или биодеградацию пластика. Так, вид *Phanerochaete chrysosporium*, вызывающий белую гниль древесины, в условиях ограниченного содержания азота и углерода разлагал полиэтилен [22]. Признаки разрушения пластика грибом проявлялись в снижении массы полимера и различных деформациях поверхности, наблюдаемых при микроскопии. При сравнении *S. commune* с грибом *Ph. chrysosporium* и другими представителями белой гнили *Ceriporiopsis subvermispora* и *Gloeophyllum trabeum*, у шизофиллума было выявлено большее разнообразие ферментов, гидролизующих углеводы, по сравнению с тремя другими ксилотрофными видами. В процессе гидролиза лигноцеллюлозной биомассы эффективность гриба *S. commune* превосходила эффективность коммерческого ферментного препарата, полученного из *Trichoderma longibrachiatum* [2]. Эти результаты послужили предиктором к выяснению деградативного потенциала штамма EO22 в отношении ПНД.

Таблица / Table
Изменение массы ПНД за 60 сут совместной инкубации с *S. commune* EO22
Change in HDPE mass over 60 days of co-incubation with *S. commune* EO22

№ повторения No. repetitions	Масса исходная, г Initial weight, g	Масса после инкубации, г Weight after incubation, g	Убыль массы / Loss of mass	
			г/г	%
1	0,1539	0,1528	0,0011	0,7
2	0,1610	0,1603	0,0007	0,4
3	0,1527	0,1521	0,0006	0,4
4	0,1572	0,1566	0,0006	0,4
5	0,1509	0,1494	0,0015	1,0
6	0,1596	0,1591	0,0005	0,3
7	0,1599	0,1596	0,0003	0,2
8	0,1411	0,1392	0,0019	1,3
9	0,1416	0,1413	0,0003	0,2
Среднее / Average	0,1531±0,0074	0,1523±0,0078	0,0008±0,0005	0,5

А. А. Широких, И. Г. Широких
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.

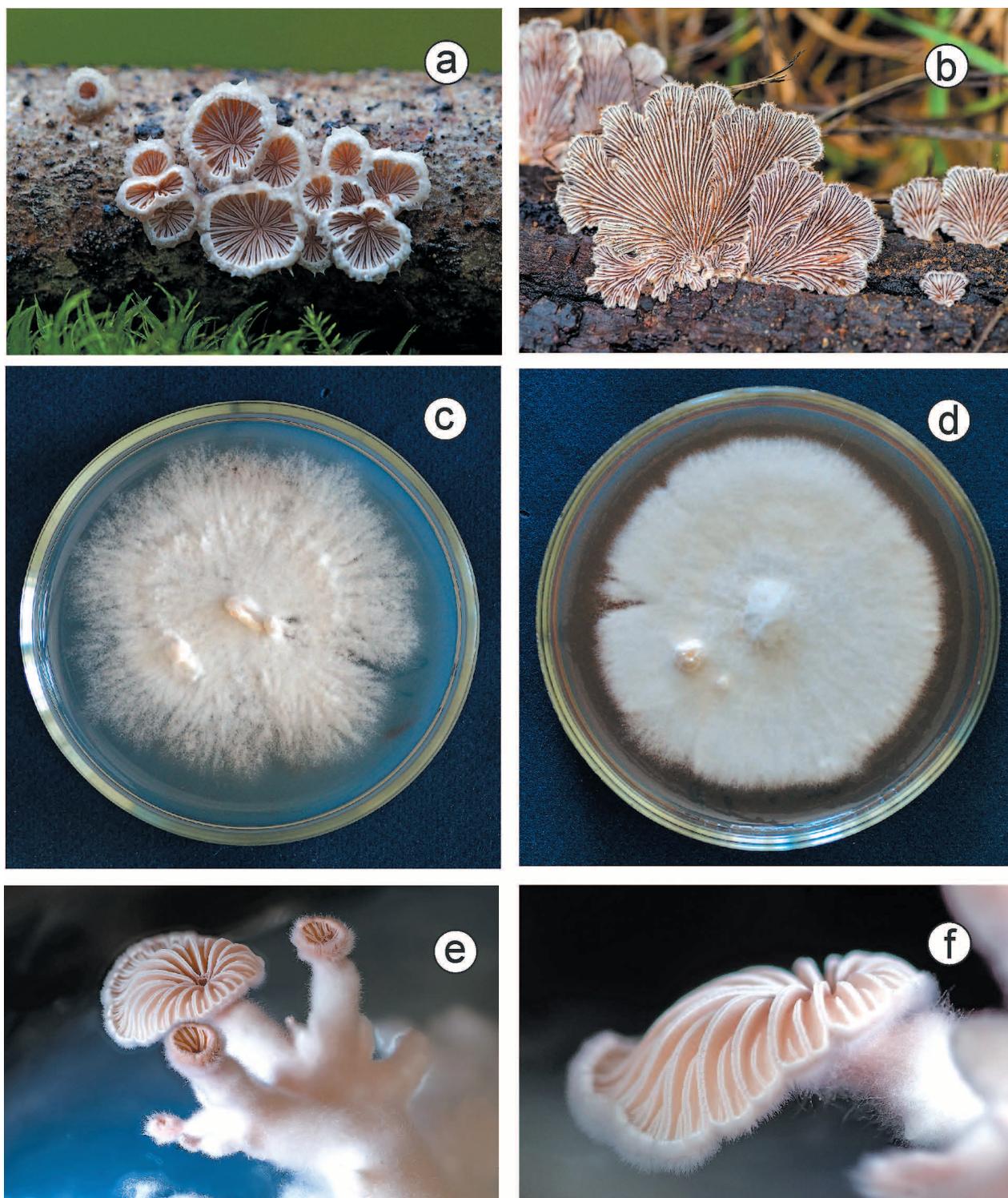


Рис. 1. Плодовые тела *S. commune* на природных субстратах (a, b); колонии и базидиокарпы штамма EO22 на картофельно-сахарозном (c, e) и солодовом агаре (d, f)
Fig. 1. *S. commune* fruiting bodies on natural substrates (a, b); colonies and basidiocarps of the strain EO22 on potato-sucrose (c, e) and malt agar (d and f)

А. А. Широких, И. Г. Широких
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.

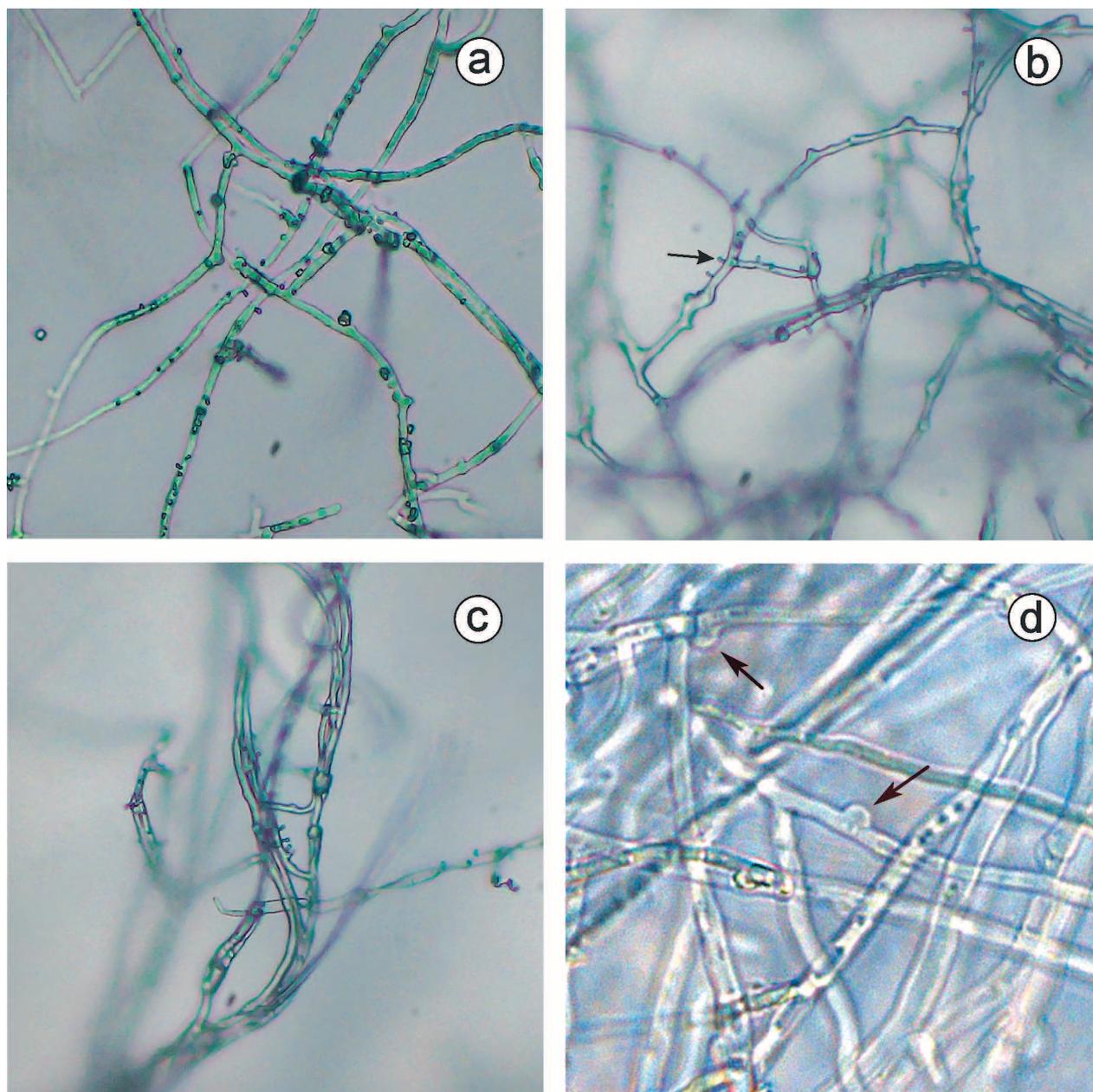


Рис. 2. Штамм *S. commune* EO22 при микроскопии: монокариотический мицелий (а), спикеры (указано стрелкой) (b), дикаризация мицелия (с), дикариотический мицелий с пряжками (указаны стрелками) (d), $\times 400$

Fig. 2. Microscopy of the *S. commune* strain EO22: monokaryotic mycelium (a), spicules (cursor) (b), forming of dicaryotic mycelium (dicarization) (c), dicaryotic mycelium with clamp connection (cursors) (d), $\times 400$

А. А. Широких, И. Г. Широких
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.

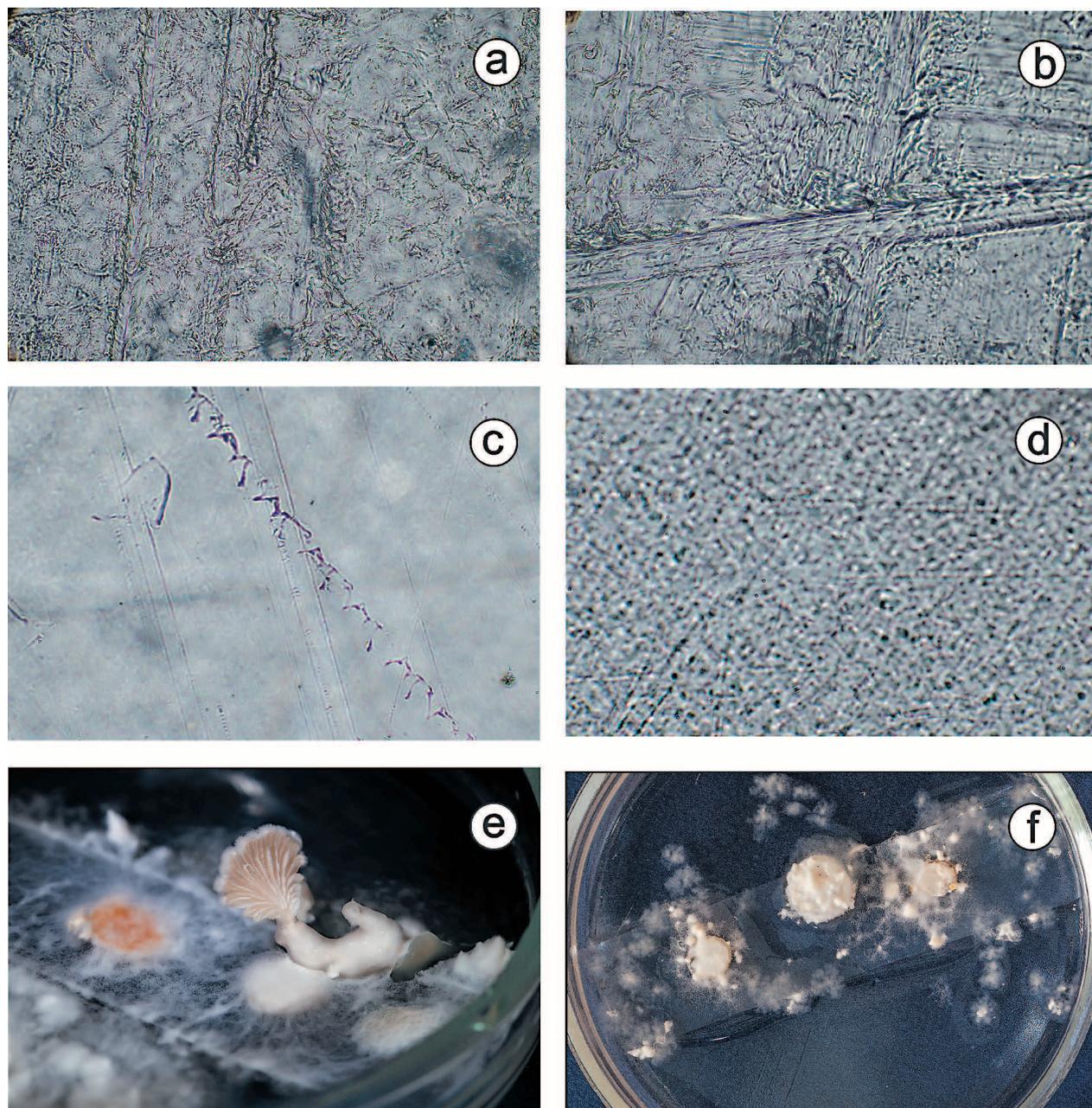


Рис. 4. Микроскопическая картина рельефа поверхности плёнки ПНД после инкубации с культурой *S. commune* EO22 в повторениях 5 (a), 8 (b), 9 (c) и в контроле (d). Формирование на плёнках ПНД макроскопических плодовых тел *S. commune* EO22 дикариотическим мицелием (e); не способный формировать плодовые тела монокариотический мицелий (f)

Fig. 4. Microscopy of the HDPE film surface after incubation with *S. commune* EO22 culture in repetitions 5 (a), 8 (b), 9 (c) and in control (d). Forming of *S. commune* EO22 macroscopic fruiting bodies on HDPE films by dicaryotic mycelium (e); monokaryotic mycelium unable to form fruit bodies (f)

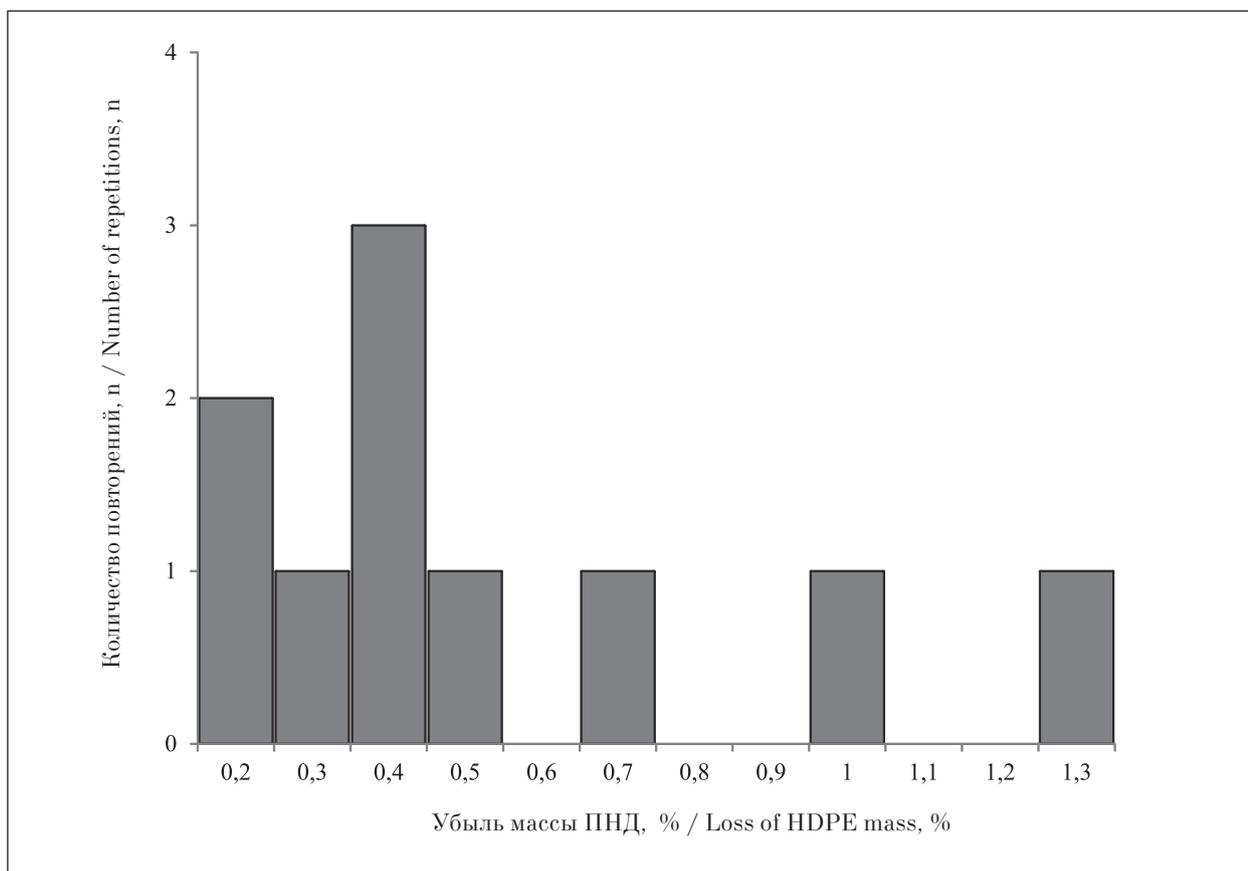


Рис. 3. Частотное распределение значений убыли массы ПНД по повторениям (n)
Fig. 3. Frequency distribution of HDPE mass loss values by repeats (n)

Экспериментальное выращивание мицелия *S. commune* EO22 в двухфазной культуре совместно с плёнкой ПНД показало, что гриб способен подвергать пластик биодegradации. Если в контроле, спустя 60 сут от начала инкубации, масса полосок ПНД не претерпела никаких изменений, составив в среднем 0,1360 г, то в опытном варианте при инкубации с грибом масса ПНД снизилась в среднем на 0,5% по сравнению с исходной (табл.).

Коэффициент вариации убыли массы ПНД в зависимости от повторения составил 66,5%. Анализ распределения по повторениям частот величин убыли массы ПНД выявил характер распределения, отличный от нормального (рис. 3), в силу чего для статистической оценки значимости различий был использован метод непараметрической статистики.

Статистическую значимость различий между исходной массой полосок ПНД и массой тех же полосок после инкубации с грибом оценивали с помощью Т-критерия Вилкоксона. Для числа пар сравнений, равному 9, табличный W-критерий при 1% уровне значимости составляет 1, а при 5% – 2. Полученное

значение ($W=0$) меньше табличного, следовательно, различия между рассматриваемыми рядами величин статистически значимы при $p=0,01$.

При микроскопии плёнок ПНД после инкубации отмечали в повторениях опытного варианта с грибом характерные изменения структуры поверхности – образование микротрещин, отверстий, перепадов высоты рельефа (рис. 4а, б, с, см. цв. вкладку VIII), отсутствующие в контроле (рис. 4д, см. цв. вкладку VIII).

Необходимо отметить, что наиболее выраженные структурные дефекты поверхности инкубированных с грибом плёнок имели место в повторениях 5 и 8, выделившихся среди остальных наиболее значительной потерей массы ПНД по сравнению с исходными значениями – 1,0 и 1,3% соответственно (табл. 1). В повторениях 7 и 9, отличающихся среди других минимальной (0,2%) убылью массы ПНД за время инкубации с грибом, деформации поверхности плёнки были выражены слабо.

Причина вариабельности выявленной картины разложения плёнки ПНД штаммом *S. commune* EO22 связана, очевидно, с различным соотношением в его популяционной

структуре монокариотического и дикариотического мицелия.

Наибольшему повреждению плёнки и более значительным количественным потерям массы способствовало развитие мицелия дикариотического типа, сопровождавшееся в опыте (повторения 1, 5, 8) формированием базидиокарпов с характерно расщеплёнными пластинками (рис. 4е, см. цв. вкладку VIII). В меньшей степени деградирующий эффект гриба в отношении ПНД проявился на монокариотической стадии роста (рис. 4ф, см. цв. вкладку VIII), когда плодовые тела не образовывались, а при микроскопии грибные гифы с пряжками не обнаруживались.

Заключение

Таким образом, полученный из природной среды новый штамм гриба *S. commune* EO22 проявил в лабораторных условиях способность разлагать плёнку ПНД, что выразилось в снижении исходной массы полимера за 60 сут на 0,5% и различных, микроскопически детектируемых, деформациях его поверхности. Процесс разложения ПНД происходил под воздействием роста мицелия исключительно дикариотического типа и сопровождался формированием базидиокарпов гриба. Способность штамма *S. commune* EO22 к росту на ПНД с формированием съедобных плодовых тел может представлять интерес в связи с развитием технологий получения пищевого белка в процессе утилизации пластиковых отходов.

Работа выполнена в рамках государственного задания FNWE-2022-0005 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) и государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» (государственная регистрация в ЕГИСУ № 122040100032-5).

References

1. Alizadeh V., Shojaosadati S.A., Zamir S.M. Enhancement of schizophyllan production in *Schizophyllum commune* using microparticles in medium // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2021. V. 44. No. 2. P. 317–328. doi: 10.1007/s00449-020-02444-z
2. Zhu N., Liu J., Yang J., Lin Y., Yang Y., Ji L., Li M., Yuan H. Comparative analysis of the secretomes of *Schizophyllum commune* and other wood-decay basidiomycetes

- during solid-state fermentation reveals its unique lignocellulose-degrading enzyme system // *Biotechnol. Biofuels.* 2016. V. 9. Article No. 42. doi: 10.1186/s13068-016-0461-x
3. Basso V., Schiavenin C., Mendonça S., de Siqueira F.G., Salvador M., Camassola M. Chemical features and antioxidant profile by *Schizophyllum commune* produced on different agroindustrial wastes and byproducts of biodiesel production // *Food Chem.* 2020. V. 329. Article No. 127089. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127089
4. Mayakrishnan V., Abdullah N., Abidin M.H.Z., Fadzil N.H.M., Johari N.M.K., Aminudin N., Abidin N.Z. Investigation of the antioxidative potential of various solvent fractions from fruiting bodies of *Schizophyllum commune* (Fr.) mushrooms and characterization of phytoconstituents // *J. Agric. Sci.* 2013. V. 5. No. 6. P. 58–68. doi: 10.5539/jas.v5n6p58
5. Yelithao K., Surayot U., Lee C., Palanisamy S., Prabhu N. M., Lee J., You S. Studies on structural properties and immune-enhancing activities of glycomannans from *Schizophyllum commune* // *Carbohydr. Polym.* 2019. V. 218. P. 37–45. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.04.057
6. Chen Z., Yin C., Fan X., Ma K., Yao F., Zhou R., Shi D., Cheng W., Gao H. Characterization of physicochemical and biological properties of *Schizophyllum commune* polysaccharide extracted with different methods // *Int. J. Biol. Macromol.* 2020. V. 156. P. 1425–1434. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.183
7. Arun G., Eyini M., Gunasekaran P. Characterization and biological activities of extracellular melanin produced by *Schizophyllum commune* (Fries) // *Indian J. Exp. Biol.* 2015. V. 53. No. 6. P. 380–387.
8. Kumar A., Bharti A.K., Bezie Y. *Schizophyllum commune*: A fungal cell-factory for production of valuable metabolites and enzymes // *BioResources.* 2022. V. 17. No. 3. P. 5420–5436. doi: 10.15376/biores.17.3.Kumar
9. Tovar-Herrera O.E., Martha-Paz A.M., Pérez-LLano Y., Aranda E., Tacoronte-Morales J.E., Pedrosa-Cabrera M.T., Arévalo-Niño K., Folch-Mallol J.L., Batista-García R.A. *Schizophyllum commune*: An unexploited source for lignocellulose degrading enzymes // *MicrobiologyOpen.* 2018. V. 7. No. 3. Article No. e00637. doi: 10.1002/mbo3.637
10. Banerjee D., Patel C., Patel K. Degradation of plastic beads containing low density polyethylene (LDPE) by sequential photolysis, hydrolysis and bacterial isolates // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2024. V. 112. No. 3. Article No. 41. doi: 10.1007/s00128-024-03853-6
11. Srikanth M., Sandeep T.S.R.S., Sucharitha K., Godi S. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review // *Bioresour. Bioprocess.* 2022. V. 9. No. 1. Article No. 42. doi: 10.1186/s40643-022-00532-4
12. Pathak V.M., Navneet. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach // *Bioresour. Bioprocess.* 2017. V. 4. Article No. 15. doi: 10.1186/s40643-017-0145-9
13. Daly P., Cai F., Kubicek C.P., Jiang S., Grujic M., Rahimi M.J., Sheteiwy M.S., Giles R., Riaz A., de Vries R.P.,

Akcapinar G.B., Wei L., Druzhinina I.S. From lignocellulose to plastics: Knowledge transfer on the degradation approaches by fungi // *Biotechnol. Adv.* 2021. V. 50. Article No. 107770. doi: 10.1016/j.biotechadv.2021.107770

14. Iiyoshi Y., Tsutsumi Y., Nishida T. Polyethylene degradation by lignin-degrading fungi and manganese peroxidase // *J. Wood Sci.* 1998. V. 44. P. 222–229. doi: 10.1007/bf00521967

15. Krueger M.C., Hofmann U., Moeder M., Schlosser D. Potential of wood-rotting fungi to attack polystyrene sulfonate and its depolymerisation by *Gloeophyllum trabeum* via hydroquinone-driven fenton chemistry // *PloS One*. 2015. V. 10. No. 7. Article No. e0131773. doi: 10.1371/journal.pone.0131773

16. Gu J.D. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2003. V. 52. No. 2. P. 69–91. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00177-4

17. Mate D.M., Alcalde M. Laccase: A multi-purpose biocatalyst at the forefront of biotechnology // *Microb. Biotechnol.* 2016. V. 10. No. 6. P. 1457–1467. doi: 10.1111/1751-7915.12422

18. Han M.L., An Q., Ma K.Y., An W.N., Hao W.Y., Liu M.Y., Shi W.Y., Yang J., Bian L.S. A comparative study

on the laccase activity of four Basidiomycete fungi with different lignocellulosic residues *via* solid-state fermentation // *BioResources*. 2021. V. 16. No. 2. P. 3017–3031. doi: 10.15376/biores.16.2.3017-3031

19. Ohm R.A., de Jong J.F., Lugones L.G., Aerts A., Kothe E., Stajich J.E., de Vries R.P., Record E., Levasseur A., Baker S.E., Bartholomew K.A., Coutinho P.M., Erdmann S., Fowler T.J., Gathman A.C., Lombard V., Henrissat B., Knabe N., Kues U., Lilly W.W., Lindquist E., Lucas S., Magnuson J.K., Piumi F., Raudaskoski M., Salamov A., Schmutz J., Schwarze F.W.M.R., vanKuyk P.A., Horton J.S., Grigoriev I.V., Wösten H.A.B. Genome sequence of the model mushroom *Schizophyllum commune* // *Nat. Biotechnol.* 2010. V. 28. No. 9. P. 957–963. doi: 10.1038/nbt.1643

20. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. Practical training in microbiology. Moskva: Academy. 2005. 608 p. (in Russian).

21. Glantz S.A. Primer of biostatistics. Moskva: Praktika, 1998. 459 p. (in Russian).

22. Shimao M. Biodegradation of plastics // *Curr. Opin. Biotechnol.* 2001. V. 12. No. 3. P. 242–247. doi: 10.1016/s0958-1669(00)00206-8

**Индивидуальная и географическая изменчивость шишек
Picea obovata в российской части ареала
в связи с количеством семян в них**

© 2024. П. П. Попов, д. б. н., г. н. с.,
М. Н. Казанцева, к. б. н., в. н. с., С. П. Арефьев, д. б. н., г. н. с.,
Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра
Сибирского отделения Российской академии наук,
625003, Россия, г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86,
e-mail: ipospopov@mail.ru

Длина шишек *Picea obovata* Ledeb. тесно связана с количеством находящихся в них семян, что обуславливает важность полномасштабного изучения этого показателя. В ходе исследований, проведённых на всей российской части ареала вида от Мурманской области до Забайкалья и Якутии, установлено, что географическая изменчивость длины шишек на территории России относительно невелика (44–77 мм) и существенно уступает изменчивости индивидуальной (45–110 мм). Коэффициент вариации составляет, соответственно, 10 и 14%. В общей совокупности видов *Picea abies* (L.) H. Karst. и *P. obovata*, определяемой их сильной интрогрессивной гибридной природой, шишки *P. obovata* относятся к категории мелких и средних. Показано, что целесообразно выделение дополнительной категории очень мелких шишек. Установленные категории характеризуются следующей длиной: шишки очень мелкие 50 (54 мм и менее), мелкие 60 (55–64 мм) и средние 70 (65 мм и более). Ориентировочное число полных семян в них при хороших урожаях составляет, соответственно, 76 шт. (в экстремальных условиях Крайнего севера – менее), 78–92 и 94–108 шт. Эти цифры важны при оценках процессов возобновления еловых лесов. Географическое распределение средних показателей длины шишек на рассматриваемой территории выражено не очень чётко. Наиболее мелкие шишки характерны для популяций ели вдоль Северного полярного круга и в Заполярье, в популяциях южной части ареала они заметно крупнее. Большинство российских популяций *P. obovata* (примерно 2/3) имеют шишки длиной 65–70 мм. Содержание полных семян в шишках сравнительно невелико.

Ключевые слова: *Picea obovata*, видовой ареал, Россия, длина шишек, число семян в шишках.

**Individual and geographic variability
of *Picea obovata* cones in the Russian part
of its area in relation to the seeds quantity in them**

© 2024. P. P. Popov ORCID: 0000-0002-0987-7402
M. N. Kazantseva ORCID: 0000-0002-1227-6720
S. P. Arefyev ORCID: 0000-0002-8621-9884

Institute for the Development of the North of the Tyumen Scientific Center,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625003,
e-mail: ipospopov@mail.ru

The cone length of *Picea obovata* Ledeb. is closely related to the seeds quantity that causes the importance of full-scale study of this indicator. Studies were carried out in the entire Russian part of the *P. obovata* range from Murmansk region to Transbaikalia and Yakutia. It was found that geographical variability of cone length is relatively small (44–77 mm) and significantly inferior to individual variability (45–110 mm). The coefficient of a variation is 10 and 14%, respectively. We found that in the total population of *Picea abies* (L.) H. Karst. and *P. obovata* determined by their strong introgressive hybridization, cones of *P. obovata* is the category small and average. It is reasonable to distinguish an additional category of very small cones. The established categories of cones are characterized by the following length: very small 50 (54 mm and less), small 60 (55–64 mm) and medium 70 (65 mm and more). The approximate number of full seeds in them at good yields is 76 (less in extreme conditions of the Far North), 78–92 and 94–108 pieces, respectively. These figures are important for assessing the processes of spruce forest regeneration. Geographical distribution of average cone length in the studied territory it is not clearly expressed. The smallest cones are characteristic of spruce populations along

Arctic Circle and in the Polar Regions, while in populations of the southern part of the range they are much larger. The majority of the Russian populations of *P. obovata* (about 2/3) have cones 65–70 mm long. The content of full seeds in cones is rather small.

Keywords: *Picea obovata*, species range, Russia, cone length, number of seeds in cones.

Ареал ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) почти полностью находится на территории России, он простирается от Кольского полуострова на западе до Охотского побережья на востоке и от Заполярья на севере до Южного Урала, Алтая на юге [1]. Леса, образованные этим видом, или с его участием в составе древостоев имеют важное хозяйственное и ландшафтно-экологическое значение [2]. Изучение биологических и лесоводческих особенностей популяций ели сибирской имеет большое научное и практическое значение [3–6]. Перспективным является изучение её репродуктивных признаков [7], в том числе длины шишек (макростробилов), в которых образуются семена, являющиеся практически единственным условием воспроизводства вида [8, 9]. Длину шишек ели, независимо от видовой принадлежности, указывают и при ботанической характеристике. Этот признак практически всегда изучался по отдельным районам ареала. При этом очень мало внимания уделялось индивидуальной изменчивости шишек, то есть по отдельным деревьям в пределах популяций [7, 8, 10]. К настоящему времени сложилось мнение, что в среднем длина шишек ели сибирской равна 6–8 см. Но ареал вида так обширен, и, соответственно, условия формирования популяций так разнообразны, что вряд ли этот признак укладывается в указанные параметры.

Целью настоящей работы является оценка индивидуальной и географической изменчивости длины шишек ели сибирской по всему её ареалу на территории России.

Объекты и методы исследования

Исходным материалом для изучения послужили 70 популяционных выборок шишек ели сибирской на обширной территории Российской части её ареала. При выборе пунктов сбора материала исходили не только из соображений наиболее полного охвата ареала ели сибирской, но и охвата фенотипов её особей, выделяемых по морфометрическим параметрам семенных чешуй [11–13]. Учитывали также площадь еловых лесов по регионам [1], при этом стремились к равномерному размещению пунктов на всей территории ареала в России (рис. 1).

Сборы шишек проводили в летний период, в лесорастительных условиях, близких к лучшим в районе. В большинстве случаев под каждым деревом (IV–VI класса возраста) на участке брали одну шишку средней длины. Для анализа популяционной изменчивости признака полученный образец вполне репрезентативен [14]. По этим «средним» шишкам рассчитывали статистические показатели для каждой популяционной выборки. В ряде пунктов Среднего Урала (п. Красновишерск и Добрянка в Пермском крае, г. Карпинск и п. Ревда в Свердловской и Нязе-Петровск в Челябинской области) собирали все шишки при сплошной рубке деревьев для определения их семенной продуктивности. На севере Ямало-Ненецкого автономного округа шишки собирали в конце августа со стоящих деревьев, поскольку высота их небольшая. В выборках использовали шишки, собранные со 100 и более деревьев, а общее их число составляет 10657 шт. Длину шишек в закрытом состоянии измеряли обычным способом (линейкой). Измерять длину шишек ели более точным прибором, например, штангенциркулем, как это указано в работе [3], при значительной изменчивости и большом их количестве не имеет смысла, поскольку точность средней величины признака больше зависит от числа наблюдений. Во всех 70 выборках проанализировали индивидуальную (внутрипопуляционную – между деревьями) изменчивость признака. Для характеристики уровня изменчивости признаков приведены предельные значения (Limit) и коэффициент вариации (C_v). Организационно-методические приёмы сбора и обработки материалов рассматривались ранее [10, 15] с учётом других предложений [14]. В Ханты-Мансийском автономном округе (пункт 47 на рис. 1) помимо изучения изменчивости длины шишек между деревьями определили также изменчивость этого показателя в пределах крон деревьев, так называемую эндогенную [14] или метамерную изменчивость. На основании выявленной ранее зависимости числа и массы 1000 шт. полных семян от длины шишек ели сибирской [16] определили ориентировочное их число в шишках разной длины.

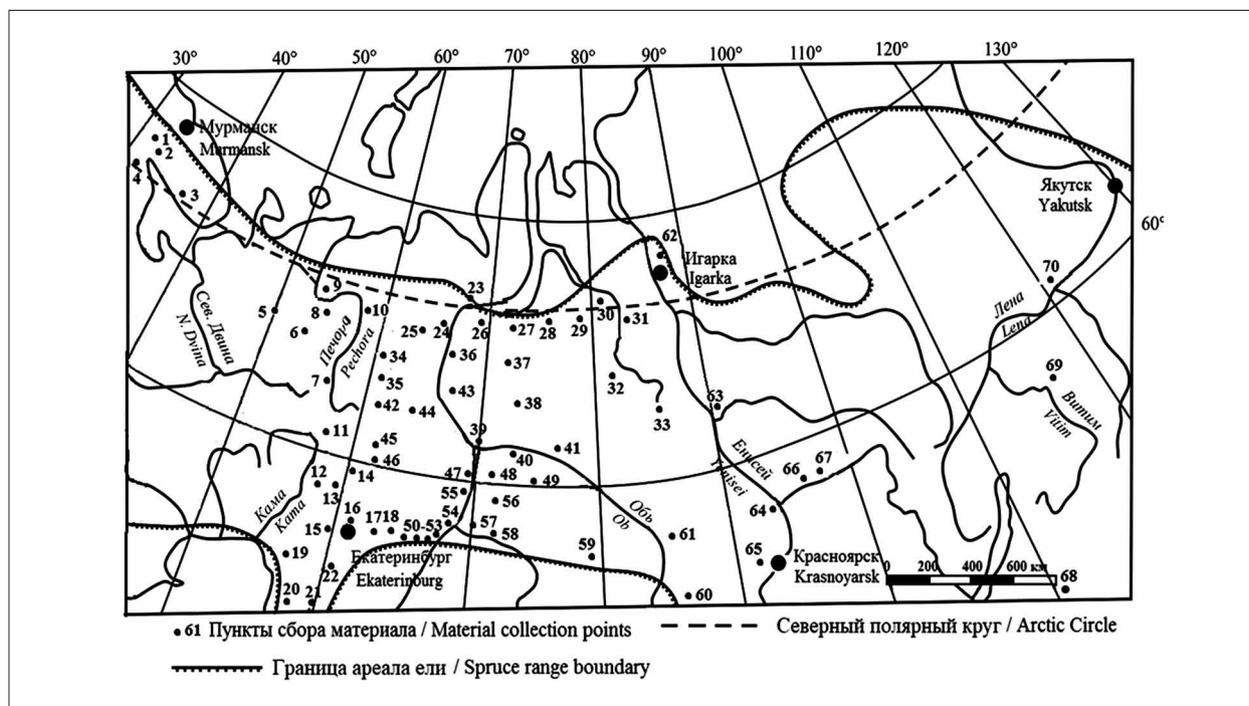


Рис. 1. Расположение пунктов (1–70) сбора материалов для изучения изменчивости шишек ели сибирской в российской части ареала: 1 – Мончегорск, 2 – Апатиты, 3 – Умба, 4 – Средний, 5 – Кослан, 6 – Ухта, 7 – Троицко-Печорск, 8 – Ижма, 9 – Усть-Цильма, 10 – Печора, 11 – Ныроб, 12 – Чусовой, 13 – Теплая Гора, 14 – Кытлым, 15 – Висим, 16 – Екатеринбург, 17 – Юшала, 18 – Тугулым, 19 – Арибашево, 20 – Красный Ключ, 21 – Аша, 22 – Нязепетровск, 23 – Салехард, 24 – Ямгорт, 25 – Овгорт, 26 – Подуй, 27 – Надым, 28 – Новый Уренгой, 29 – Самбург, 30 – Тазовский, 31 – Красноселькуп, 32 – Толька, 33 – Ратта, 34 – Саранпауль, 35 – Хулга, 36 – Полноват, 37 – Нумто, 38 – Когалым, 39 – Тренька, 40 – Нялино, 41 – Нижневартовск, 42 – Усть-Манья, 43 – Октябрьское, 44 – Зеленоборск, 45 – Междуреченский, 46 – Куминский, 47 – Чембакчина, 48 – Салым, 49 – Угут, 50 – Леваша, 51 – Успенское, 52 – Велижаны, 53 – Янтык, 54 – Тобольск, 55 – Уват, 56 – Демьянское, 57 – Вагай, 58 – Дубровное, 59 – Кыштовка, 60 – Горно-Алтайск, 61 – Томск, 62 – Игарка, 63 – Подкаменная Тунгуска, 64 – Енисейск, 65 – Красноярск, 66 – Бедоба, 67 – Дербина, 68 – Кыра, 69 – Бодайбо, 70 – Олёкминск / **Fig. 1.** Location of points (1–70) of collecting materials for studying the variability of *Picea obovata* cones in the Russian part of its area: 1 – Monchegorsk, 2 – Apatity, 3 – Umba, 4 – Srednii, 5 – Koslan, 6 – Ukhta, 7 – Troitsko-Pechorsk, 8 – Izhma, 9 – Ust-Tsil'ma, 10 – Pechora, 11 – Nyrob, 12 – Chusovoi, 13 – Tyoplaya Gora, 14 – Kytlym, 15 – Visim, 16 – Ekaterinburg, 17 – Yushala, 18 – Tugulym, 19 – Aribashevo, 20 – Krasnyi Klyuch, 21 – Asha, 22 – Nyazepetrovsk, 23 – Salekhard, 24 – Yamgort, 25 – Ovgort, 26 – Polui, 27 – Nadyum, 28 – Novyi Urengoi, 29 – Samburg, 30 – Tazovskii, 31 – Krasnoselkup, 32 – Tol'ka, 33 – Ratta, 34 – Saranpaul, 35 – Khulga, 36 – Polnovat, 37 – Numto, 38 – Kogalym, 39 – Tren'ka, 40 – Nyalino, 41 – Nizhnevartovsk, 42 – Ust-Man'ya, 43 – Oktyabr'skoye, 44 – Zelenoborsk, 45 – Mezhdurechenskii, 46 – Kuminskii, 47 – Chembakchina, 48 – Salym, 49 – Ugut, 50 – Levashi, 51 – Uspenskoye, 52 – Velizhany, 53 – Yantyk, 54 – Tobol'sk, 55 – Uvat, 56 – Dem'yanskoye, 57 – Vagai, 58 – Dubrovnnoye, 59 – Kyshtovka, 60 – Gorno-Altaysk, 61 – Tomsk, 62 – Igarka, 63 – Podkamennaya Tunguska, 64 – Yeniseisk, 65 – Krasnoyarsk, 66 – Bedoba, 67 – Derbina, 68 – Kyra, 69 – Bodaibo, 70 – Olyokminsk

Результаты и обсуждение

В пределах крон деревьев ели сибирской длина шишек характеризуется сравнительно небольшой изменчивостью, коэффициент вариации составляет 8–10%, максимальное значение (max) превышает минимальное (min) в 1,6–1,7 раза, при распределении показателя признака, близком к нормальному (табл. 1). В индивидуальной изменчивости признака максимальное значение (в среднем 110 мм) превосходит минимальное (45 мм) в 2,4 раза, коэффициент вариации составляет 14 (10–18) %.

В распределении выборок по средней длине шишек ели сибирской наблюдается четко выраженная отрицательная асимметрия (рис. 2, табл. 2). Показатель эксцесса недостоверен. Средняя длина шишек по отдельным выборкам изменяется от 44 до 77 мм, при среднем значении по всей совокупности выборок, равном $65,0 \pm 0,8$ мм. Наибольшее число выборок (46 из 70) оказывается с длиной шишек 65–70 мм. Примерно такую же длину их в разных районах указывают и другие авторы [17, 18]. Коэффициент вариации средних значение длины шишек составляет

всего 10%. Географическая изменчивость признака оказывается заметно ниже индивидуальной (14%) и практически такой же, как в кронах деревьев.

Распределение выборок по показателю минимальной длины шишек (min) не отличается от нормального, а по максимальному значению (max) оно достоверно отрицательно асимметрично. По величине коэффициента вариации распределение не отличается от нормального. Между средней длиной шишек (L_c) и показателями min и max существует достоверная высокая линейная корреляция: между L_c и min корреляционное отношение равно $0,765 \pm 0,079$, коэффициент корреляции – $0,749 \pm 0,081$; между L_c и max они составляют $0,848 \pm 0,065$ и $0,840 \pm 0,066$ соответственно.

Географическая изменчивость популяций по средней длине шишек характеризуется некоторой мозаичностью, а изменение признака в направлении север-юг и запад-восток наблюдается лишь в самом общем виде (рис. 3).

Вобщей совокупности видов *Picea abies* (L.) Н. Karst. и *P. obovata*, определяемой их сильной интрогрессивной гибридизацией, шишки *P. obovata* относятся к категории мелких и средних. По средней длине шишек ели (от западных районов бывшего СССР до Якутии) было выделено 3 категории: шишки мелкие 6 см и менее, средние 7–8 см и крупные 9 см и более [15]. Шишки ели сибирской в анализируемой совокупности выборок относятся к мелким и средним. Из группы мелких считаем

Таблица 1 / Table 1

Изменчивость длины шишек в кронах деревьев ели сибирской (окрестности д. Чембакчина, Ханты-Мансийский автономный округ) / Variability of the cone length in the crowns of *Picea obovata* (vicinity of the Chembakchina, Khanty-Mansi Autonomous Okrug)

№ дерева Tree No.	L_c , мм/mm			Отношение max/min Attitude max/min	Ax	t	Ex	t
	Lim	$X \pm S_x$	C_v , %					
1	38–65	$53,0 \pm 0,5$	10	1,71	-0,214	0,90	0,167	0,36
2	46–75	$64,0 \pm 0,5$	8	1,63	-0,279	1,17	0,093	0,46
3	55–93	$73,0 \pm 0,7$	10	1,69	0,519	2,14	0,163	0,35

Примечание: с каждого дерева измерено по 100 шишек. Здесь и в таблице 2: L_c – длина шишек, Lim – крайние значения, $X \pm S_x$ – среднее значение и его стандартная ошибка, C_v – коэффициент вариации, min – минимальное и max – максимальное значение, Ax – коэффициент асимметрии, Ex – коэффициент эксцесса, t – показатель достоверности. $t_{0,05} = 1,96$.

Note: 100 cones were measured from each tree. Here and in table 2: L_c – cone length, Lim – extreme values; $X \pm S_x$ – average value and its standard error; C_v – coefficient of variation; min – minimum and max – maximum value; A_x – coefficient of asymmetry; E_x – coefficient of excess; t – confidence indicator. $t_{0,05} = 1.96$.

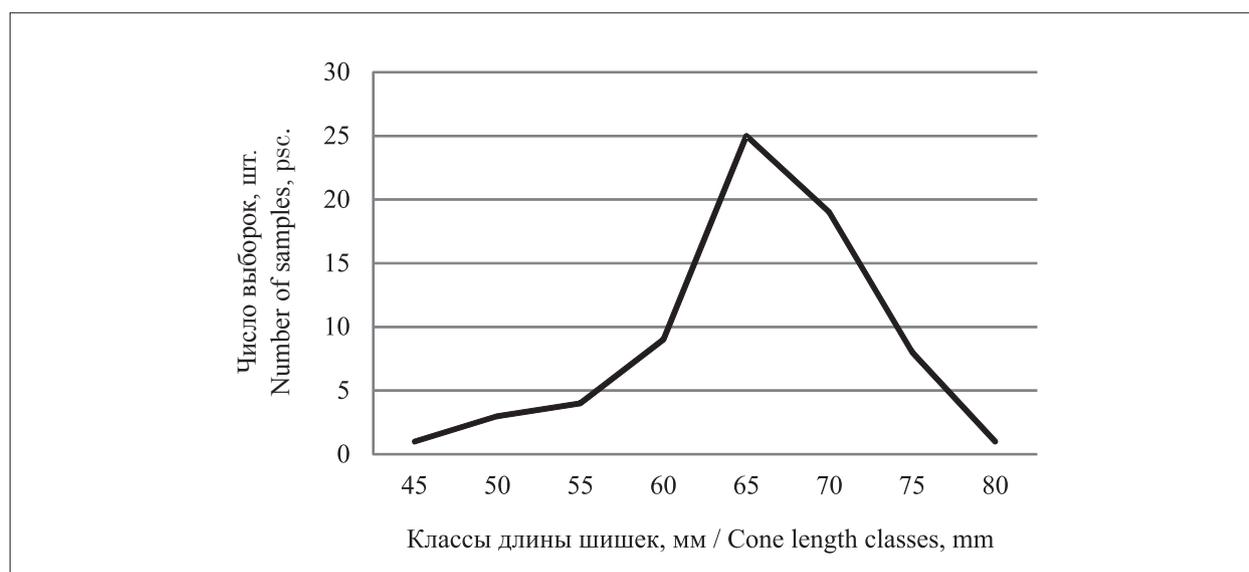


Рис. 2. Распределение популяционных выборок по классам длины шишек ели сибирской в российской части ареала / Fig. 2. Distribution of population samples by cone length classes of *Picea obovata* in the Russian part of its range

Таблица 2 / Table 2

Географическая изменчивость средних показателей (X, Min, Max, C_v) длины шишек ели сибирской в российской части ареала / Geographical variability of average indicators (X, Min, Max, C_v) of *Picea obovata* cone length in the Russian part of its range

Показатели признака Index	Lim, мм Lim, mm	X±Sx	C _v	Med	Ax	t	Ex	t
X	50(44)–75	64,6±0,7	9	66	–0,709	2,49	0,014	–
Min	29–56	44,9±0,7	13	45	–0,293	1,03	–0,327	0,60
Max	65–110	88,1±0,9	9	90	–0,677	2,38	0,596	1,09
C _v	10–18	13,7±0,19	12	14	–0,199	0,82	0,227	0,42

Примечание: Med – медиана.
Note: Med – median.

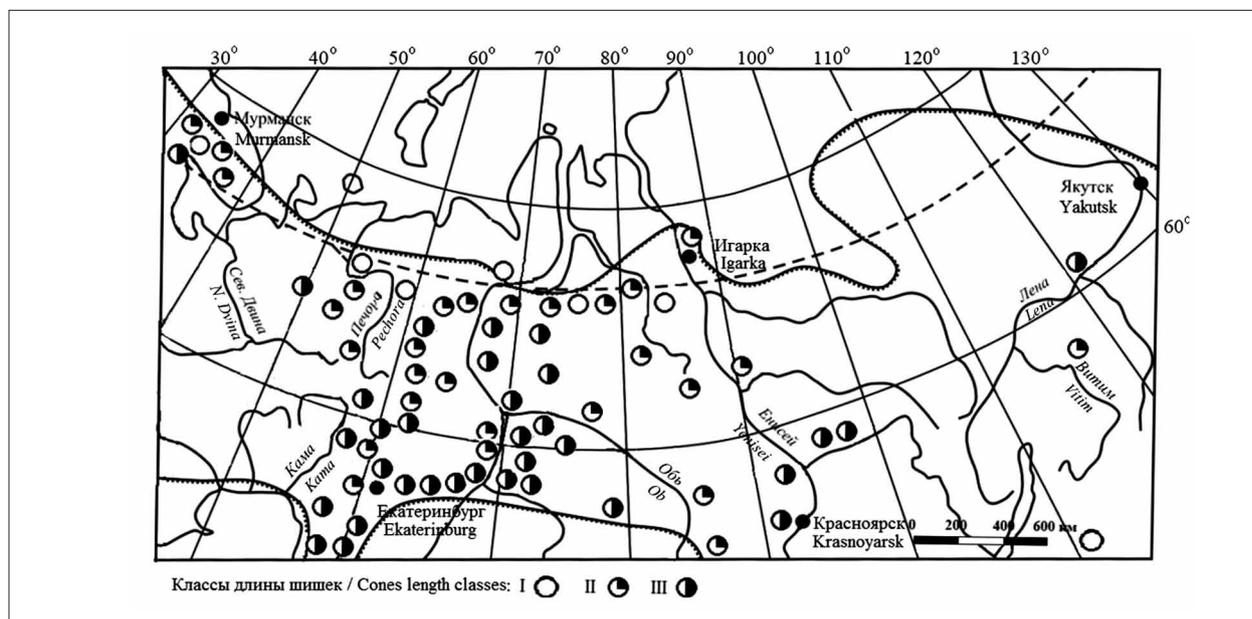


Рис. 3. Географическая изменчивость ели сибирской в российской части ареала по классам длины шишек: I – 54 мм и менее, II – 55–64 мм, III – 65 мм и более
Fig. 3. Geographical variability of *Picea obovata* in the Russian part of its area by cone length classes: I – 54 mm and less, II – 55–64 mm, III – 65 mm and more

Таблица 3 / Table 3

Распределение выборок по классам длины шишек ели сибирской в российской части ареала
Distribution of samples by length classes of cones of *Picea obovata* in the Russian part of the range

Классы длины шишек, мм Cone length classes, mm	Категория шишек по длине Cone length category	N	№ выборок Sample No.	Средняя длина шишек, мм The average cone length, mm	Ориентировочное число полных семян в шишке, шт. Estimated number of full seeds in a cone, pcs.
50 (54 и менее) 50 (54 and less)	Очень мелкие Very small	7	2, 21, 22, 23, 28, 29, 68	51,0±1,3	76 и менее 76 and less
60 (55–64)	Мелкие Small	27	1, 3, 7, 9, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 41, 42, 44, 45, 47, 58, 60, 61, 62, 63, 69	62,0±0,5	87(78–92)
70 (65 и более) 70 (65 and more)	Средние Medium	36	4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 43, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 59, 64, 65, 66, 67, 70	69,0±0,4	98(94–108)

Примечание: N – число выборок.
Note: N – number of samples.

целесообразным выделить группу очень мелких шишек (табл. 3).

Популяций с очень мелкими шишками довольно много, и располагаются они в основном вдоль Северного полярного круга и в Заполярье. Они, как правило, содержат мало полных семян, к тому же с пониженной всхожестью [19]. Общее число (и крупность) семян разное.

Очень мелкие шишки, как, например, на Среднем Урале, содержат в среднем 69 шт. семян [16]. В условиях Крайнего севера на многих деревьях даже в годы хорошего урожая шишек совсем нет полных семян, а на других деревьях их бывает значительно меньше (до 1–7 шт. в шишке), масса 1000 шт. равна около 4 г. Всхожесть семян здесь составляет от 1 до 60% [17, 18]. Но в данных условиях и такие семена представляют собой большую ценность для воспроизводства вида и северного лесоводства [20, 21]. Было отмечено, что в сибирской части ареала имеется значительное сходство в географической изменчивости средних показателей длины шишек и разности коэффициентов сужения и вытянутости верхней части семенных чешуй ($C_n - C_p$), что важно при выделении географических популяций ели. Корреляционное отношение равно $0,543 \pm 0,121$, коэффициент корреляции составляет $-0,530 \pm 0,122$, т. е. связь прямолинейная [10]. В анализируемой совокупности популяций корреляционное отношение равно $0,547 \pm 0,102$, коэффициент корреляции составляет $-0,399 \pm 0,111$. Связь существенно отличается от прямолинейной ($\eta^2 - R^2 = 0,14 > 0,1$). Эти различия обусловлены тем, что в европейской части ареала, особенно в Мурманской области, с уменьшением длины шишек уменьшается (хотя и не во всех случаях) и величина $C_n - C_p$.

Как видно, на территории России ель сибирская характеризуется некрупными шишками. В отдельные годы в некоторых её популяциях шишки могут быть несколько крупнее, но обычно они не очень отличаются от категории средних [18, 22]. Можно предположить, что и в других частях ареала за пределами России, на севере Скандинавского полуострова, на территории Монголии и Китая они не крупнее. При этом они содержат сравнительно небольшое количество полных семян даже в годы хороших урожаев шишек, а на северном пределе распространения ели сибирской во много раз меньше.

Заключение

Ель сибирская в российской части ареала характеризуется сравнительно небольшой гео-

графической изменчивостью длины шишек (50–75 мм) и заметно большей индивидуальной (45–88 мм). Коэффициент вариации составляет 10 и 14% соответственно. В общей системе интрогрессивно гибридизирующихся видов елей европейской и сибирской шишки относятся к категории мелких и средних. Целесообразно выделение категории очень мелких шишек – 50 (54 мм и менее), мелких – 60 (55–64 мм) и средних – 70 (65 мм и более). Соответственно изменяется и число в них полных семян. Ориентировочно оно составляет 76 шт. и менее (в очень мелких шишках), 78–92 шт. (в мелких), 94–108 шт. (в средних). Географический тренд средних показателей длины шишек выражен не очень чётко. Наиболее мелкие шишки (50 мм и менее) отмечаются обычно в популяциях ели вдоль Северного полярного круга и в Заполярье, в южной части региона они заметно крупнее (70–75 мм). Наибольшее число популяций (примерно 2/3) имеют шишки длиной 65–70 мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2021-0006).

Литература

1. Атлас лесов СССР. М.: Глав. упр. геодез. картогр. СССР, 1973. 222 с.
2. Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 333 с.
3. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М.: Наука, 1975. 178 с.
4. Милютин Л.И. О таксономическом статусе и внутривидовой изменчивости ели сибирской (*Picea obovata*) // Бот. журн. 2015. Т. 100. № 1. С. 33–38.
5. Пахарькова Н.В., Шкарубо А.Д., Сорокина Г.А., Гаевский Н.А., Григорьев Ю.С., Калякина О.П., Шубин А.А., Полосухина М.А. Влияние загрязнения воздуха на экофизиологические показатели сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в урбоэкосистемах Южной Сибири // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 90–97. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-090-097
6. Лиханова И.А., Железнова Г.В., Пыстина Т.Н., Лаптева Е.М. Формирование притундровых лесов на карьерах строительных материалов // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 4. С. 88–94. doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-088-094
7. Яблоков А.А., Золотухин Ф.М., Проказин А.Е., Малкин В.К. Семеноведение – актуальное направление лесной науки // Лесн. хоз-во. 1987. № 7. С. 36–38.

8. Borghetti M., Giannini R., Menozzi P. Geographic variation in cones of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Silvae Genet.* 1988. V. 37. No. 5–6. P. 178–184.

9. Biology and ecology of Norway spruce / Eds. M.G. Tjoelker, A. Boratyński, W. Bugala. Springer, 2007. 474 p. doi: 10.1007/978-1-4020-4841-8

10. Казанцева М.Н., Арефьев С.П., Попов П.П. Индивидуальная и географическая изменчивость шишек и формы семенных чешуй ели сибирской в сибирской части ареала // *Лесоведение.* 2019. № 3. С. 198–207. doi: 10.1134/S0024114819020037

11. Тарханов С.Н. Популяционная изменчивость ели финской по форме семенных чешуй на севере Архангельской области // *Лесоведение.* 2019. № 3. С. 208–214. doi: 10.1134/S0024114819020116

12. Попов П.П., Арефьев С.П., Казанцева М.Н. Фенотипическое разнообразие популяций ели некоторых особо охраняемых природных территорий на востоке Европы и в Сибири // *Nature conservation research.* Заповедная наука. 2019. Т. 4. № 4. С. 26–33. doi: 10.24189/ncr.2019.060

13. Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России // *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2021. № 2. С. 9–20. doi: 10.37482/0536-1036-2021-2-9-20

14. Мамаев С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений // *Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений: труды ИЭРиЖ УНЦ АН СССР.* Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1975. С. 3–14.

15. Попов П.П. Популяционно-географическая изменчивость шишек ели европейской и сибирской // *Лесоведение.* 2011. № 5. С. 54–60.

16. Попов П.П. Предварительная оценка выхода семян из шишек ели // *Лесн. хоз-во.* 1996. № 6. С. 35–36.

17. Науменко А.М. *Picea obovata* Ldb. на крайнем северо-восточном пределе своего ареала // *Бот. журн.* 1964. Т. 49. № 7. С. 1008–1013.

18. Говорин Г.М. Изменчивость ели сибирской в бассейне Енисея // *Лесоведение.* 1992. № 5. С. 56–60.

19. Норин Б.Н. К познанию семенного и вегетативного возобновления древесных пород в лесотундре // *Растительность Крайнего Севера СССР и её освоение.* М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Вып. 3. С. 154–244.

20. Дымов А.А., Загирова С.В., Марченко-Вагапова Т.И. Формирование еловых биогеоценозов на Полярном Урале // *Лесоведение.* 2011. № 5. С. 12–22.

21. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А. Изменчивость морфоструктурных признаков ели разного возраста в условиях севера Архангельской области // *Лесн. журн.* 2019. № 2. С. 56–66. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.56

22. Коропачинский И.Ю., Потемкин О.Н., Рудиковский А.В., Кузнецова Е.В. Полиморфизм и структура популяций ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на северном пределе распространения вида // *Сиб. экол. журн.* 2012. № 2. С. 175–184.

References

1. USSR Forest Atlas. Moskva: Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii SSSR, 1973. 222 p. (in Russian).

2. Rysin L.P., Savelieva L.I. Spruce forests of Russia. Moskva: Nauka, 2002. 333 p. (in Russian).

3. Pravdin L.F. Norway Spruce and Siberian Spruce in the Soviet Union. Moskva: Nauka, 1975. 178 p. (in Russian).

4. Milyutin L.I. On the taxonomic status and intra-specific variability of Siberian spruce (*Picea obovata*) // *Botanicheskiy zhurnal.* 2015. V. 100. No. 1. P. 33–38 (in Russian).

5. Pakharkova N.V., Shkaruba A.D., Sorokina G.A., Gaevskiy N.A., Grigoriev Yu.S., Kalyakina O.P., Shubin A.A., Polosukhina M.A. Influence of air pollution on the ecophysiological parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in the urban ecosystems of Southern Siberia // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 3. P. 90–97 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-090-097

6. Likhanova I.A., Zheleznova G.V., Pystina T.N., Lapteva E.M. Formation of near-tundra forests on open pit mines // *Theoretical and Applied Ecology.* 2019. No. 4. P. 88–94 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-088-094

7. Yablokov A.A., Zolorukhin F.M., Prokazin A.E., Malkin V.K. Seed studies is the actual direction of the forest science // *Lesnoye khozyaystvo.* 1987. No. 7. P. 36–38 (in Russian).

8. Borghetti M., Giannini R., Menozzi P. Geographic variation in cones of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Silvae Genet.* 1988. V. 37. No. 5–6. P. 178–184.

9. Biology and ecology of Norway spruce / Eds. M.G. Tjoelker, A. Boratynski, W. Bugala. Springer, 2007. 474 p. doi: 10.1007/978-1-4020-4841-8

10. Kazantseva M.N., Arefyev S.P., Popov P.P. Individual and geographic variability of cones and seed scale forms of Siberian spruce in Siberian part of the range // *Lesovedeniye.* 2019. No. 3. P. 198–207 (in Russian). doi: 10.1134/S0024114819020037

11. Tarkhanov S.N. Population variability of Finnish spruce from the seed scale forms in Northern Arkhangelsk Oblast // *Lesovedeniye.* 2019. No. 3. P. 208–214 (in Russian). doi: 10.1134/S002411481902011619

12. Popov P.P., Arefyev S.P., Kazantseva M.N. Phenotypic diversity of spruce populations in some protected areas in Eastern Europe and Siberia // *Nature Conservation Research.* 2019. V. 4. No. 4. P. 26–33 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2019.060

13. Popov P.P., Kazantseva M.N., Arefyev S.P. Phenotypic structure of spruce populations in the European North of Russia // *Russian Forestry Journal.* 2021. No. 2. P. 9–20 (in Russian). doi: 10.37482/0536-1036-2021-2-9-20

14. Mamaev S.A. The main principles of the methodology for the study of intraspecific variability of woody plants // Individual and ecological and geographic variability in plants: trudy IERiZh UNTs AN SSSR. Sverdlovsk: Izdatel'stvo UNTs AN SSSR, 1975. P. 3–14 (in Russian).
15. Popov P.P. Population-geographical variability of Norway spruce and Siberian spruce cones // Lesovedenie. 2011. No. 5. P. 54–60 (in Russian).
16. Popov P.P. Preliminary assessment of seed efficiency of pine cones // Lesnoye khozyaystvo. 1996. No. 6. P. 35–36 (in Russian).
17. Naumenko A.M. *Picea obovata* Ledeb. on the northeastern limit of its range // Botanicheskiy zhurnal. 1964. V. 49. No. 7. P. 1008–1013 (in Russian).
18. Govorin G.M. Variability of Siberian spruce in the Yenisei basin // Lesovedenie. 1992. No. 5. P. 56–60 (in Russian).
19. Norin B.N. Understanding seed and vegetative recovery of tree species in forest-tundra // Rastitel'nost' Krainego Severa SSSR i ee osvoenie. Moskva–Leningrad: Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR. 1958. No. 3. P. 154–244 (in Russian).
20. Dymov A.A., Zagirova S.V., Marchenko-Vagapova N.I. The formation of spruce biogeocenoses in the Polar Urals // Lesovedenie. 2011. No. 5. P. 12–22 (in Russian).
21. Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A. Variability of morphostructural features of uneven-aged spruce in the North of Arkhangelsk Region // Russian Forestry Journal. 2019. No. 2. P. 56–66 (in Russian). doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.56
22. Koropachinskiy I.Yu., Potemkin O.N., Rudikovskiy A.V., Kuznetsova E.V. Polymorphism and structure of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) populations at the northern limits of the species distribution // Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2012. No. 2. P. 175–184 (in Russian).

Влияние абиотических факторов на продуктивность тростника *Phragmites australis* в озёрах юга Западной Сибири

© 2024. Е. Ю. Зарубина, к. б. н., с. н. с.,

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1,
e-mail: zeur11@mail.ru

В статье представлены результаты исследования фитомассы, высоты стеблей и плотности зарослей (травостоя) тростника обыкновенного *Phragmites australis* на юге Западной Сибири. Этот регион отличается редким сочетанием на сравнительно небольшом пространстве хлористых, сульфатных и содовых озёр. Будучи эврибиотом, тростник обладает высокой устойчивостью к засолению воды и грунтов, однако высокий уровень засоления негативно сказывается на его росте и развитии. Целью работы была оценка степени влияния абиотических факторов (рН, минерализация) на количественные характеристики тростника, растущего в водоёмах с различной степенью минерализации воды: от 0,005 до 387,6 г/л. Всего исследовано 59 пресных, солоноватоводных (олиго-, мезо- и полигалинных) и гипергалинных солёных водоёма, расположенных в различных природных зонах юга Западной Сибири: южной таёжной, лесной, лесостепной, степной и сухостепной. В результате проведённых исследований показано, что оптимальной для роста и развития тростника является минерализация воды от 0,5 до 5,0 г/л, при которой наблюдаются наибольшие значения фитомассы и высоты растений. Отмечено, что с увеличением минерализации воды (выше 9 г/л при концентрации хлоридов выше 4000 мг/л) наблюдается значительное снижение фитомассы и высоты побегов при увеличении плотности травостоя. Для оценки зависимости фитомассы, высоты побегов и плотности травостоя от абиотических факторов построена модель на основе анализа избыточности (RDA) и проведён корреляционный анализ с учётом рН, солёности, ионов Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-} . Установлено, что в пресных озёрах лимитирующими факторами для плотности травостоя и образования фитомассы являются рН и жёсткость воды, определяемая Ca^{2+} . В солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных водоёмах на фитомассу тростника влияет весь комплекс факторов, в то время как на высоту побегов – рН, хлориды и жёсткость воды, а на плотность травостоя – хлориды и сульфаты.

Ключевые слова: тростник, фитомасса, высота побега, плотность травостоя, солёность, рН.

Abiotic factors affect the *Phragmites australis* productivity in lakes in the south of Western Siberia

© 2024. E. Yu. Zarubina ORCID: 0000-0002-0006-3103*

Institute for Water and Environmental Problems
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia, 656038,
e-mail: zeur11@mail.ru

The article presents the results of studying phytomass, stem height and density of thickets (herbage) of *Phragmites australis*, one of the most common aerial-aquatic plant in the south of Western Siberia. This region is distinguished by a rare combination of chloride, sulfate and soda lakes in a relatively small space. As an eurybiont, reed is highly resistant to water and soil salinity, but high salinity adversely affects its growth and development. The aim of the work was to assess the degree of abiotic factors (pH, mineralization) effect on the quantitative characteristics of reed growing in water bodies with different water mineralization: from 0.005 to 387.6 g/L. In total, we studied 59 freshwater, brackish-water (oligo-, meso- and polyhaline) and hypersaline water bodies, located in various natural zones (southern taiga, forest, forest-steppe, steppe and dry-steppe) in the south of Western Siberia. The studies were carried out in late July – early August from 2012 to 2020 during the period of maximum vegetation of plants. As a result of the studies, it is shown that the optimal for reed growth and development is water mineralization from 0.5 to 5.0 g/L, when the highest values of biomass and plant height are observed. A model based on redundancy analysis (RDA) was built and a correlation analysis was carried out to assess the dependence of phytomass, shoot height and herbage density on abiotic factors. We took into account pH, salinity, and Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-} content. We found that pH and determined

by Ca^{2+} water hardness are the limiting factors in freshwater lakes. In brackish-water meso- and polyhaline, as well as in saline hyperhaline water bodies reed phytomass is affected by a whole range of factors, while shoot height is affected by pH, chlorides, and water hardness, and grass stand density is affected by chlorides and sulfates.

Keywords: *Phragmites australis*, phytomass, shoot height, density, salinity, pH.

Воздушно-водные растения, развивающиеся в литорали водоёмов, являются одними из наиболее активных продуцентов органического вещества в биосфере. В качестве основного продуцента они служат источником пищи консументам: беспозвоночным, рыбам и травоядным птицам. Одним из наиболее распространённых воздушно-водных растений на Земле является тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.). Он встречается в самых разнообразных экотопах: на почвах с близким стоянием грунтовых вод, по берегам водоёмов или в воде, на глубине от 0,5 до 2,5 м; в травянистых топях; заболоченных лугах; на болотах; солонцах. Тростник – эврибионт, и может произрастать как в пресных, так и в солоноватых и солёных водоёмах, часто образуя обширные заросли [1]. Заросли тростника являются средообразующим фактором в литоральной зоне водоёмов, где создаётся свой, отличный от основной акватории, гидрофизический, гидротермический и гидрохимический режим. Стебли тростника служат субстратом для развития фито- и зооперифитона, убежищем для зоопланктона и мальков рыб [2]. Будучи почти космополитом, тростник нашёл широкое применение в различных сферах жизни человека. Он используется в качестве растительной основы при производстве корма для растительноядных рыб [3], как основа при создании экологически чистых строительных материалов [4], топливных брикетов и гранул [5].

Находясь на границе между водосборным бассейном и водоёмом, тростник задерживает загрязняющие вещества, поступающие с водосбора, и поэтому широко используется для фиторемедиации сильнозагрязнённых прудов-отстойников и шламонакопителей, очистки систем сточных вод и даже для фиторемедиации солёных шахтных вод [6–9].

На юге Западной Сибири тростник встречается практически во всех пресных, солоноватых и солёных озёрах. Сообщества тростника образуют бордюры разной мощности, окаймляющие водоём; иногда формируют сплавины, которые могут отрываться от основных зарослей и дрейфовать по акватории. Заросли тростника могут образовывать острова на акватории или почти полностью занимать акваторию

в озёрах-займищах. На рост и продуктивность тростника оказывает влияние большое количество факторов: физико-географические условия, колебания уровня воды, содержание доступных питательных веществ в воде и донных отложениях, величина минерализации воды, pH.

Большинство исследований влияния минерализации воды на макрофиты связаны с экспериментальным изучением приспособительных реакций растений к высокой солёности воды [10–13]. Работ, касающихся изучения продукционных характеристик макрофитов в различных по солёности водоёмах, немного [14]. В работе [15] показано, что растения из засоленных мест обитания обладают физиологическими и морфологическими адаптациями к экстремальным условиям солёности и pH.

Цель исследования – оценить степень влияния абиотических факторов (pH, минерализация) на высоту, биомассу и плотность зарослей тростника в разнотипных озёрах юга Западной Сибири.

Объекты и методы исследования

В рамках данного исследования были изучены фитомасса, плотность зарослей (травостоя) и высота стеблей тростника обыкновенного *Phragmites australis*, растущего в водоёмах с различной минерализацией воды от 0,005 до 387,6 г/л. Всего было исследовано 18 пресных, 34 солоноватоводных (олиго-, мезо- и полигалинных) и 7 гипергалинных солёных водоёма, расположенных в южной таёжной, лесной, лесостепной и степной зонах юга Западной Сибири. Такое разнообразие объектов исследования позволило охватить широкий спектр солёности природных вод и оценить степень её влияния на количественные характеристики тростниковых сообществ. Исследования проводили в конце июля – начале августа с 2012 по 2020 гг. в период максимальной вегетации растений. Фитомассу тростника отбирали классическим методом укоса на укосных площадках размером 0,25 м² в 3–5 повторностях [16]. Каждый укос разбирали по видам, подсчитывали число побегов, измеряли высоту и сырую массу с точностью

до 5 г. В камеральных условиях укосы досушивали при $t=85^{\circ}\text{C}$ до абсолютно сухого веса.

Во время полевых исследований параллельно с отбором проб тростника измеряли температуру, минерализацию и pH воды с помощью портативного кондуктометра АНИОН-4120 (Инфраспек-Аналит НПП, Россия) *in situ*. Прибор перед началом измерений калибровали. Одновременно отбирали пробы воды для проведения химического анализа, который был выполнен в Институте водных и экологических проблем СО РАН [17–19] и Институте геологии и минералогии СО РАН по стандартным методикам [20, 21].

Статистическая обработка материала проведена в пакете программ MS Excel-2016, Statistica 6.0, PAST (PALeontological Statistics) Version 4.06. Для оценки влияния факторов среды на количественные характеристики тростника применяли анализ избыточности (RDA, redundancy analysis). Этот метод канонической ординации позволяет выполнить совместную обработку наборов данных и проверить статистические гипотезы о значимости внутренних взаимодействий и о влиянии внешних факторов [22]. Поскольку разброс данных по биомассе, минерализации и отдельным ионам отличается на несколько порядков, для получения корректных результатов все данные были подвергнуты преобразованию Хеллингера: логарифмированию ($\lg(x+1)$) [23, 24].

Результаты и обсуждение

Меридиональная протяжённость и пологий рельеф юга Западно-Сибирской равнины с севера на юг детерминируют последовательную смену климатических условий с гумидного типа (южная тайга, зона смешанных и широколиственных лесов), через умеренный (северная и центральная лесостепь) на аридный (южная лесостепь, степь и подзона ленточных боров). Расположенные на этой территории озёра имеют существенную вариативность гидрохимических параметров даже в пределах небольшой территории [21]. Однако, в целом, по мере продвижения с севера на юг из гумидной зоны в аридную, наблюдается увеличение солёности воды. Основным источником поступления солей служат грунты, засоленность которых держится в пределах 0,1–1,5% [25].

Все исследованные озёра по степени минерализации воды, согласно Венецианской системе классификации природных вод [26],

были отнесены к пяти классам: пресные (с солёностью менее 0,5 г/л); солоноватоводные олигогалинные (0,5–5,0 г/л), мезогалинные (5,0–18,0 г/л) и полигалинные (18–30 г/л); солёные гипергалинные (более 40 г/л).

В южно-тайжной и лесной зонах преобладают пресные озёра гидрокарбонатно-натриевой группы, величина pH соответствует слабо кислым или нейтральным водам (табл. 1). Озёра северной и центральной лесостепи, как правило, солоноватоводные олигогалинные (солёность 0,5–2,6 г/л) гидрокарбонатно-натриевой группы, в период исследований вода в этих озёрах имела слабощелочной характер (pH 8,2–9,6). Озёра южной лесостепи преимущественно солоноватоводные мезогалинные (5,4–18,0 г/л), по ионному составу – гидрокарбонатно-натриевые и хлоридно-натриевые, активная реакция среды слабощелочная (pH 8,8–9,7). Озёра степной зоны существуют в условиях недостаточного увлажнения и избыточной теплообеспеченности. Больше 50% из них солоноватоводные полигалинные (19,4–29,1 г/л) или солёные гипергалинные (58,2–387,6 г/л) с преобладанием сульфатного и сульфатно-хлоридного типов накопления. Кислотность среды соответствует нейтральным или слабощелочным водам (pH 7,4–9,6).

Количественные показатели тростника в озёрах с разной степенью солёности значительно различались (табл. 2). В пресных озёрах фитомасса тростника была относительно высокой, однако разброс её колебаний был значительный. Минимальная фитомасса (164 г/м²) отмечена в оз. Лайское (зона южной тайги) с очень низкой минерализацией воды (0,005 г/л), максимальная (1160 г/м²) – в оз. Минзелинское (зона смешанных и широколиственных лесов) с минерализацией воды 0,23 г/л. В солоноватоводных олигогалинных озёрах фитомасса тростника была максимальной среди всех исследованных групп озёр и достигала довольно высоких значений в оз. Жилое (2016 г/м²) и оз. Нижнее (3304 г/м²) при минерализации воды 0,84 и 0,54 г/л соответственно.

При увеличении минерализации воды фитомасса тростника значительно снижается (рис. 1). Так, если в мезогалинном оз. Горькое (минерализация 7,2 г/л) фитомасса тростника достигала 1424 г/м², то в оз. Заливное (минерализация 9,2 г/л) она составляла всего 120 г/м². Кроме минерализации воды в этом озере на состояние тростника оказывали влияние, вероятно, и другие факторы. Однако,

Таблица 1 / Table 1

Гидрохимические характеристики исследованных групп озёр
Hydrochemical characteristics of the studied groups of lakes

Класс солёности Salinity class	pH	Солёность, г/л Salinity, g/L	НСО ₃ ⁻ , мг/л mg/L	Сl ⁻ , мг/л mg/L	SO ₄ ²⁻ , мг/л mg/L
Пресные Freshwater	5,0–9,9	0,005–0,440	136,0–429,2	1,2–71,6	2,3–37,5
Солоноватоводные / Saltish water					
Олигогалинные Oligohaline	8,2–9,7	0,5–5,0	119,5–6185,4	3,3–2256,0	11,4–1760,0
Мезо- и полигалинные Meso- and Polyhaline	8,2–10,1	5,4–29,2	190–11730	1241–11536	480–7304
Солёные / Saline waters					
Гипергалинные Hypersaline	7,4–9,9	58,2–387,6	268–41669	2998–237936	2833–60130

Таблица 2 / Table 2

Количественные показатели тростника в озёрах различных классов солёности
Reed quantitative indicators in lakes of different salinity classes

Показатель / Indicator	FW	OH	MH+PH	HS
Фитомасса, г/м ² Phytomass, g/m ²	624±298	1170±550	434±163	394±157
Плотность травостоя, стебл./м ² Density, stem/m ²	115±69	216±106	97±70	197±94
Высота, см / Height, cm	136±35	165±41	105±44	81±23

Примечание: FW – пресные, OH – олигогалинные, MH+PH – мезо- и полигалинные, HS – гипергалинные.
Note: FW – Freshwater, OH – Oligohaline, MH+PH – Meso- and Polyhaline, HS – Hypersaline.

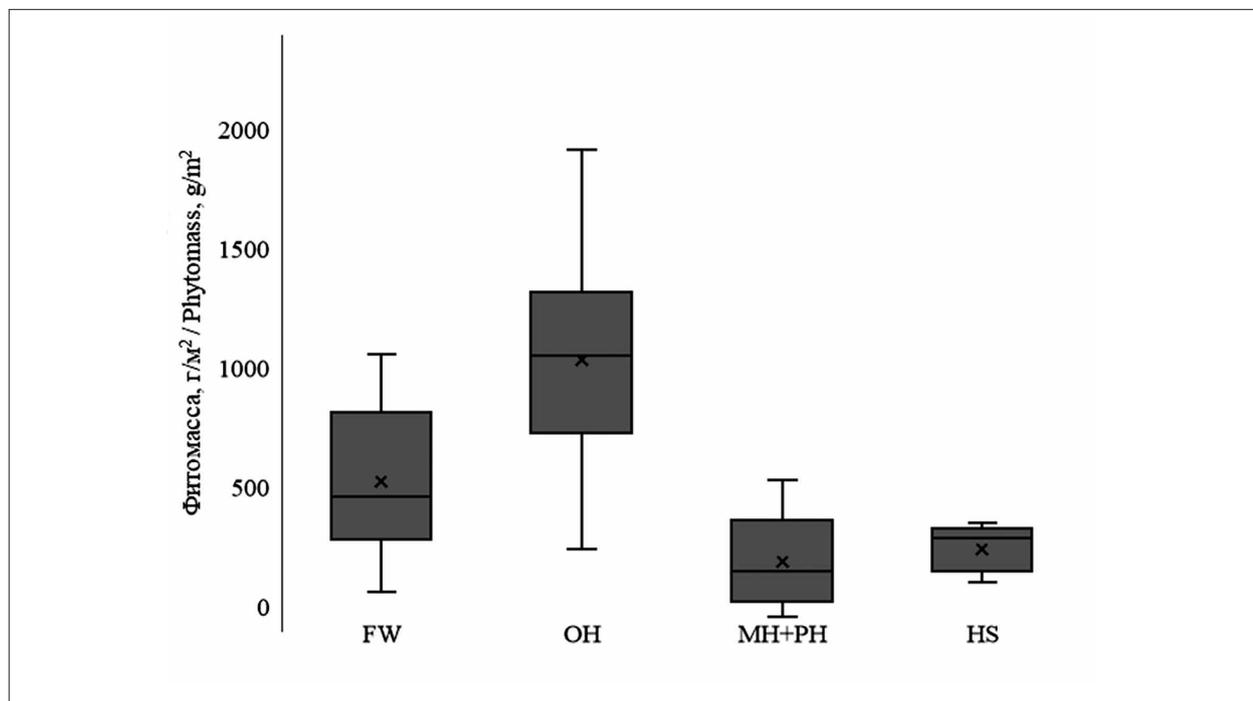


Рис. 1. Фитомасса тростника (г/м²) в озёрах различных классов солёности.
Обозначения FW, OH, MH, PH и HS см. в таблице 2
Fig. 1. Phytomass (g/m²) of *Phragmites australis* in lakes of different salinity classes.
See Table 2 for designations of FW, OH, MH, PH, and HS

Фитомасса тростника в других гипергалинных озёрах также была низкой, максимальное значение (430 г/м^2) отмечено в озере без названия (Михайловский р-н, Алтайский край) и оз. Красновишнёвое (400 г/м^2) с солёностью воды $83,2$ и $297,7 \text{ г/л}$ соответственно. Тростник в оз. Красновишнёвое рос как по берегам, образуя бордюры шириной $2-7 \text{ м}$, так и в воде на глубине до 20 см . В период исследований среди стеблей тростника, растущего на берегу, было много отложений соли, образованной в результате испарения воды при понижении уровня озера, которая осаждалась на стеблях и грунте. Как правило, в полигалинных и, особенно, гипергалинных озёрах тростник встречался преимущественно на влажных берегах и очень редко заходил в воду. Однако в период высокого уровня воды в солёных озёрах тростник был отмечен на глубине до $0,5 \text{ м}$.

Концентрация в воде минеральных солей оказывает значительное влияние не только на фитомассу, но и на высоту тростника и плотность тростниковых зарослей. В пресных и олигогалинных озёрах высота стеблей тростника была значительно больше, чем в солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных. Так, если в пресных водоёмах высота тростника колебалась в пределах $75,7-191,3 \text{ см}$, то в олигогалинных это значение составляло уже $107,5-291,7 \text{ см}$. Максимальная высота тростника (около 292 см) была отмечена в оз. Чича при солёности воды $0,8 \text{ г/л}$. С ростом минерализации воды высота тростника, как и фитомасса, значительно уменьшалась, при этом, как и для фитомассы, критическим был уровень минерализации выше 9 г/л . В мезо- и полигалинных озёрах минимальная высота стеблей тростника (60 см), как и биомасса, отмечена в оз. Заливное ($9,2 \text{ г/л}$). В гипергалинных озёрах высота тростника колебалась в пределах $54-113,6 \text{ см}$ и была минимальной в оз. Балансор (минерализации $387,6 \text{ г/л}$).

Таким образом, при сравнении фитомассы, высоты стеблей и плотности зарослей тростника отмечено, что с увеличением минерализации воды наблюдается значительное снижение фитомассы и высоты тростника и увеличение плотности травостоя. Так, в гипергалинных озёрах при наименьшей высоте тростника плотность зарослей колебалась в пределах $78-322 \text{ экз./м}^2$, что было близко к значениям для олигогалинных озёр ($68-516 \text{ экз./м}^2$) и выше, чем в пресных водоёмах ($34-272 \text{ экз./м}^2$). В мезо-, поли- и гипергалинных озёрах тростник растёт преимущественно по берегам

в местах близкого расположения грунтовых вод, что позволяет ему выдерживать высокий уровень засоленности воды и грунтов. На таких озёрах встречаются как прямостоящие, так и стелющиеся побеги тростника, имеющие ксероморфное строение с короткими (длиной $5-12 \text{ см}$) и утолщёнными листьями с острым шипом на конце и диаметром побегов $2-5 \text{ мм}$.

Для оценки зависимости фитомассы, высоты тростника и плотности травостоя от абиотических факторов была построена модель на основе анализа избыточности (RDA) с учётом следующих показателей: pH, солёность (как сумма ионов), ионов Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-} , которые определяют солёность и жёсткость воды. Статистический анализ вспомогательных моделей, которые были построены для каждого отдельного фактора, показал, что в озёрах с разной степенью солёности на рост и развитие тростника оказывают влияние разные факторы.

В пресных озёрах значимое влияние ($p < 0,05$) на фитомассу и плотность травостоя оказывали кислотность среды (pH) и концентрация ионов Ca^{2+} , Na^+ и K^+ . Полная модель RDA объясняла $70,9\%$ от общей дисперсии. При этом если кислотность среды была положительно связана с фитомассой и отрицательно с плотностью травостоя, то жёсткость воды, определяемая ионами Ca^{2+} , как и концентрация ионов Na^+ и K^+ , оказывали отрицательное влияние на количественные показатели тростника (рис. 2). Значительное влияние на плотность травостоя в пресных озёрах оказывали хлориды и сульфаты, имеющие здесь невысокую концентрацию. При этом на высоту тростника все эти абиотические факторы значительного влияния не оказывали. Эти данные были подтверждены и результатами корреляционного анализа.

Значимая положительная корреляционная связь ($p < 0,05$) была отмечена между фитомассой и pH среды (коэффициент корреляции (КК) равен $0,69$), а также между плотностью травостоя и pH (КК= $0,49$). Значимая отрицательная корреляционная связь наблюдалась между фитомассой и жёсткостью воды, определяемой ионами Ca^{2+} (КК= $-0,56$), K^+ (КК= $-0,64$) и Na^+ (КК= $-0,59$). Плотность травостоя тоже имела значимую отрицательную корреляционную связь с Ca^{2+} (КК= $-0,57$), K^+ (КК= $-0,57$) и Na^+ (КК= $-0,59$).

В олигогалинных озёрах значимого влияния рассматриваемых абиотических факторов на количественные характеристики тростника не выявлено.

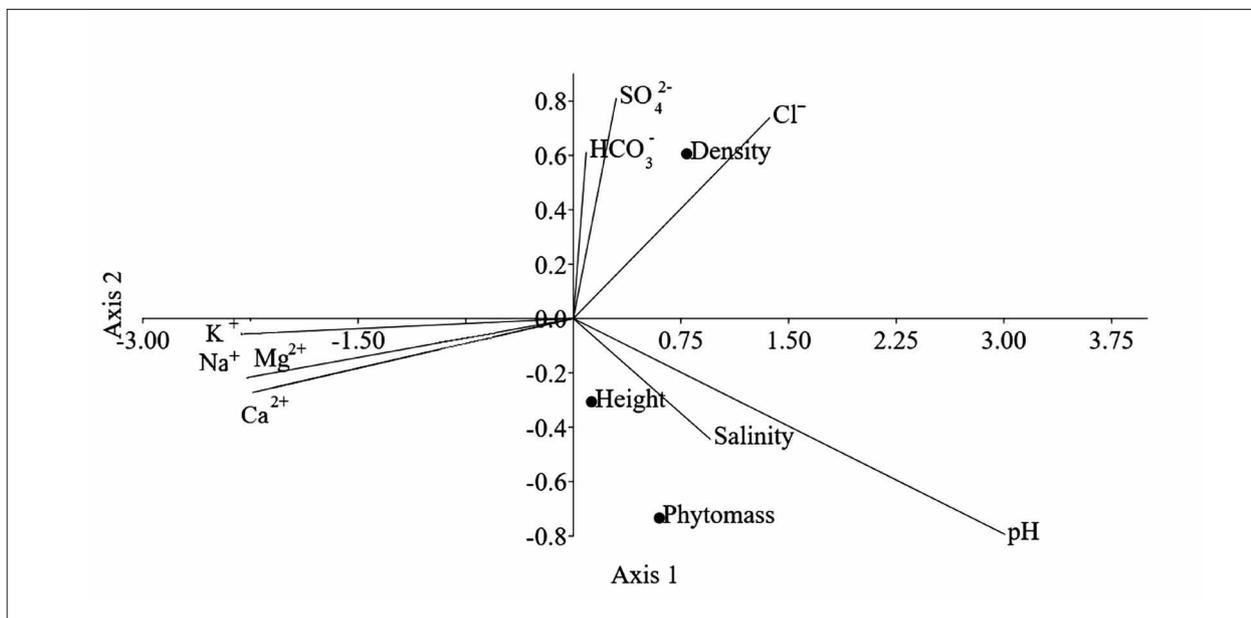


Рис. 2. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности для количественных показателей тростника в пресных озёрах
Fig. 2. Ordination chart based on the results of redundancy analysis for *Phragmites australis* quantitative indicators in freshwater lakes

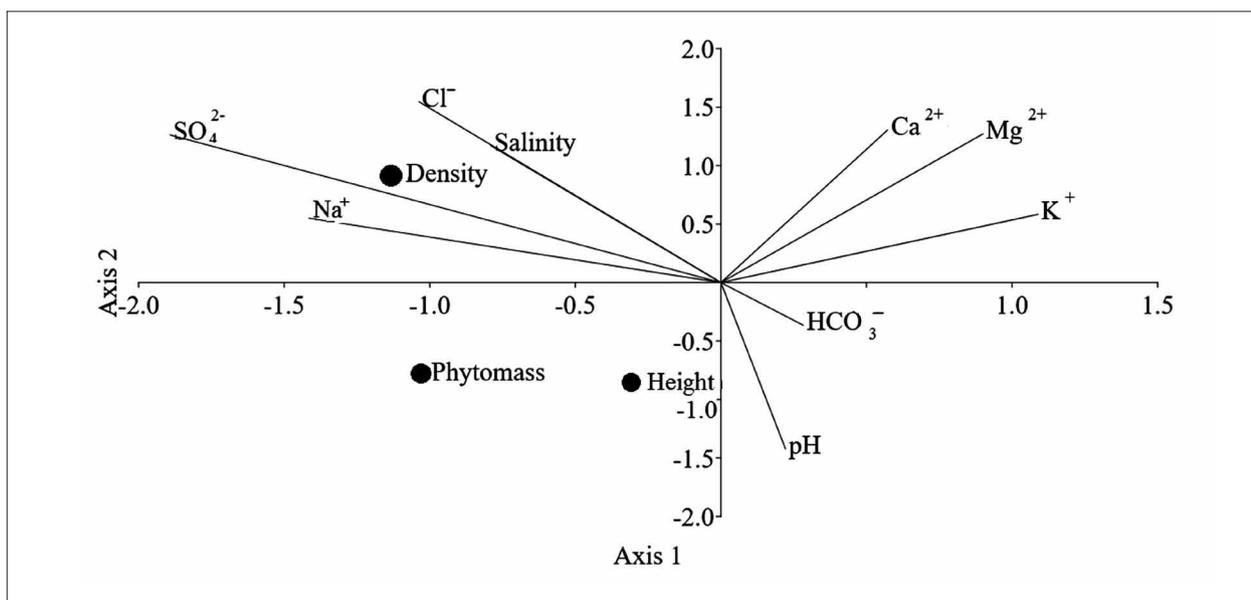


Рис. 3. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности для количественных показателей тростника в мезо-, поли- и гипергалинных озёрах
Fig. 3. Ordination chart based on the results of redundancy analysis for *Phragmites australis* quantitative indicators in meso- and polyhaline, and hypersaline lakes

Статистический анализ вспомогательных моделей, которые были построены для каждого отдельного фактора в озёрах с высокой солёностью (мезо-, поли- и гипергалинных), показал, что значимым влиянием ($p < 0,05$) обладали все рассматриваемые факторы, кроме гидрокарбонатов HCO_3^- (рис. 3). Полная модель RDA объясняла 67,24% от общей дисперсии количественных показателей тростника. Статистически значимыми в модели были первые

три оси. Вектор, характеризующий плотность травостоя, расположился на второй оси среди коррелирующих между собой векторов SO_4^{2-} и Cl^- и показателем Salinity (солёность), что указывает на сильную прямую зависимость от этих факторов. Вектор фитомассы был связан с тремя осями и находился в обратной зависимости от всех рассматриваемых факторов. Вектор, характеризующий высоту тростника, расположился по третьей оси вдоль вектора pH.

Для фитомассы тростника в этих озёрах имели значение все рассматриваемые факторы, увеличение концентраций которых приводило к снижению фитомассы. На высоту тростника наибольшее положительное влияние оказывал рН воды, влияние других факторов было менее значимым. Для плотности травостоя наиболее значимыми абиотическими факторами были концентрация в воде ионов SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ и солёность воды в целом.

Полученные данные подтверждаются результатами корреляционного анализа. Значимая положительная корреляционная связь ($p < 0,05$) отмечена между высотой тростника и рН ($KK=0,70$), отрицательная – между высотой тростника и содержанием в воде хлора ($KK=-0,55$), кальция ($KK=-0,85$) и магния ($KK=-0,79$). Прямая корреляционная связь наблюдалась между плотностью травостоя и содержанием в воде хлоридов ($KK=0,60$) и сульфатов ($KK=0,77$).

Таким образом, наиболее оптимальные условия для роста и продуктивности тростника были отмечены в солонатоводных олигогалинных гидрокарбонатно-натриевых озёрах северной и центральной лесостепи с минерализацией воды от 0,5 до 5,0 г/л и нейтральной реакцией среды. Высота стеблей, плотность травостоя и фитомасса тростника в этих озёрах были максимальными. В озёрах других рассматриваемых групп на рост и продуктивность тростника оказывали влияние разные абиотические факторы. Однако в целом лимитирующее влияние рассмотренных абиотических факторов проявлялось в тех случаях, когда они достигали минимальных или, наоборот, максимальных значений.

В пресных озёрах южной тайги лимитирующее влияние на фитомассу тростника и плотность травостоя оказывали кислотность среды и жёсткость воды, определяемая ионами кальция. Если повышение кислотности воды оказывало благоприятное влияние на тростник (как правило, в этих озёрах слабокислые воды), то с ионами кальция, калия и натрия была отмечена отрицательная связь.

В солонатоводных мезо- и полигалинных, а также в солёных гипергалинных озёрах на градиенте увеличения солёности воды и концентрации хлоридов и сульфатов высота и фитомасса тростника значительно снижались, а количество побегов на 1 м^2 , напротив, увеличивалось. Таким образом, снижение биомассы и высоты тростника компенсировалось более плотным расположением растений. Подобное явление было также отмечено в [27] для

засолённых местообитаний нижнего Днепра. По данным [27], критическим для тростника в этих водоёмах была концентрация хлоридов 5000–6000 мг/л, при максимальной – 20 000 мг/л. В исследованных нами озёрах критическим значением была солёность воды выше 9 г/л и концентрация хлоридов выше 4000 мг/л, при которой наблюдалось резкое снижение высоты стеблей и фитомассы тростника. Однако тростник в озёрах юга Западной Сибири встречался и в озёрах с солёностью воды до 387,6 г/л и концентрацией хлоридов до 238 тыс. мг/л. По сырым берегам гипергалинных озёр Малиновое, Балансор, Кулундинское, Красновишнёвое развивались карликовые растения высотой 50–60 см с утолщёнными листьями при сильной редукции длины и площади листовых пластинок. Фитомасса тростника в этих озёрах не превышала 200–250 г/м². Уменьшение высоты стеблей, длины листовой пластинки и биомассы тростника в условиях засоления были отмечены и другими авторами [28, 29]. Прогрессирующее снижение массы и общей листовой поверхности растений при нарастании солевого стресса некоторые авторы связывают с торможением ростовых процессов [30] и физиологическим старением растений [31]. Способность тростника обитать в условиях высоких концентраций солей связана с выработкой различных физиологических и биохимических защитных механизмов, таких как управление осмотическим процессом, изменение морфологической и анатомической структур [31], что выражается в увеличении толщины листа и числа крупных проводящих пучков на единице его поверхности, возрастании водозапасающих тканей, уменьшении объёма и диаметра водопроводящих пучков, снижении плотности устьичных щелей и транспирации [29, 30, 32, 33].

Заключение

Тростник – воздушно-водное растение, широко распространённое на юге Западной Сибири. Будучи гелофитом и эврибионтом, тростник обладает высокой устойчивостью к засолению воды и грунтов. Несмотря на это, высокий уровень засоления воды и грунтов негативно сказывается на росте и развитии тростника. Редкое сочетание на сравнительно небольшом пространстве юга Западной Сибири хлористых, сульфатных и содовых озёр позволило оценить степень влияния абиотических факторов (рН, минерализация) на высоту, биомассу и плотность зарослей тростника.

Оптимальными для роста и развития тростника является минерализация воды от 0,5 до 5,0 г/л, при которой наблюдаются наибольшие значения биомассы и высоты растений. Лимитирующими факторами в пресных озёрах были низкие значения рН при относительно высоком содержании Ca^{2+} , определяющего жёсткость воды. В солоноватоводных мезо- и полигалинных и солёных гипергалинных водоёмах на фитомассу тростника влиял весь комплекс факторов, в то время как на высоту растений оказывали значимое влияние рН, хлориды и жёсткость воды, а на плотность травостоя – хлориды и сульфаты.

Потепление климата, о котором пишут в последнее время многие учёные, может привести к усилению аридизации на юге Западной Сибири и, как следствие, к повышению солёности природных вод. Знание того, какие элементы биотического сообщества будут сохраняться, когда озёра станут более минерализованными, имеет значение для сохранения и использования их ресурсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Литература

1. Цвелев Н.Н. Злаки СССР. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1976. 788 с.
2. Zhigulsky V.A., Shuisky V.F., Chebykina E.Yu., Zhigulskaya D.V. Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 88–93. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-088-093
3. Магзанова Д.К., Каниева Н.А., Журавлева Г.Ф. Применение тростника южного «*Phragmites australis*» в качестве сырья при производстве корма для рыб // Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы. 2016. № 2. С. 63–66 [Электронный ресурс] <https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35740> (Дата обращения: 08.07.2023).
4. Honoré M., Lecompte T., Pimbert S. Properties of *Phragmites australis* for insulating concrete application // Construction Technologies and Architecture. 2022. V. 1. P. 332–338. doi: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.332
5. Панов В.В., Кукушкина Е.Е., Женихов Ю.Н., Шахматов К.Л. Выращивание и использование биомассы тростника на обводняемых выработанных торфяных болотах. Материалы научно-экспериментальной работы. Тверь: Триада, 2016. 160 с.
6. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and bio-monitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 97. P. 124–130. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.07.017
7. Kumari M., Tripathi B.D. Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 112. P. 80–86. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.10.034
8. Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification // Sci. Total Environ. 2001. V. 281. No. 1–3. P. 87–98. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00838-5
9. Zhao Y., Yang Z., Xia X., Wang F. A shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: incorporating nutrient removal and water evapotranspiration // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5635–5644. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.053
10. Rout N.P., Shaw B.P. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes // Plant Sci. 2001. V. 160. No. 3. P. 415–423. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00406-4
11. Li F., Xie Y., Chen X., Pan Y., Deng Z., Li X. Plant distribution can be reflected by physiological responses to salinity of three submerged macrophytes from the Modern Yellow River Delta // Fundam. Appl. Limnol. 2011. V. 179. No. 3. P. 159–167. doi: 10.1127/1863-9135/2011/0179-0159
12. Jampeetong A., Brix H. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans* // Aquat. Bot. 2009. V. 91. No. 3. P. 181–186. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.003
13. Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Hadad H.R., Maine M.A. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity // Ecotoxicology. 2011. V. 20. No. 2. P. 457–465. doi: 10.1007/s10646-011-0598-0
14. Touchette B.W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2006. V. 337. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/j.jembe.2006.05.011
15. Hadad H.R., Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Maine M.A. Salinity and pH effects on floating and emergent macrophytes in a constructed wetland // Water Sci. Technol. 2018. V. 2017. No. 1. P. 270–275. doi: 10.2166/wst.2018.110
16. Папченков В.Г. Продукция макрофитов вод и методы ее изучения // Гидробиотаника: методология и методы: Материалы Школы по гидробиотанике. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. С. 137–145.
17. Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Кириллов В.В., Безматерных Д.М., Митрофанова Е.Ю., Вдовина О.Н., Винокурова Г.В., Долматова Л.А., Соколова М.И. Факторные характеристики гидробиоценозов озёр сухостепной подзоны Обь-Иртышского междуречья // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2019. № 8. С. 46–55. doi: 10.25221/levanidov.08.06
18. Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. Связь видового разнообразия макрофитов с морфометрией и гидрохими-

ческими характеристиками озёр (на примере разнотипных водоёмов Бурлинской озёрно-речной системы, юг Обь-Иртышского междуречья) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: сб. науч. ст. по материалам XVII междунар. науч.-практ. конф. Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2018. С. 66–70.

19. Зарубина Е.Ю., Дурникин Д.А. Флора солёных озёр Кулундинской равнины (юг Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2005. Т. 12. № 2. С. 341–351.

20. Страховенко В.Д., Росляков Н.А., Сысо А.И., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Пузанов А.В. Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 3. С. 336–344. doi: 10.7868/S0321059616030160

21. Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Таран О.П., Болтенков В.В. Генезис органоминеральных отложений озёр центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9. С. 1231–1243. doi: 10.15372/GiG2019093

22. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

23. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology // FEMS Microbiol. Ecol. 2007. V. 62. No. 2. P. 142–160. doi: 10.1111/j.1574-6941.2007.00375.x

24. Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems // Methods Ecol. Evol. 2010. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x

25. Поползин А.Г. **Озёра юга Обь-Иртышского бассейна**. Новосибирск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1967. 350 с.

26. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity // Limnol. Oceanogr. 1958. V. 3. No. 3. P. 346–347. doi: 10.4319/lo.1958.3.3.0346

27. Кроткевич П.Г. К вопросу использования водоохранно-очистных свойств тростника обыкновенного // Водные ресурсы. 1976. № 5. С. 191–197.

28. Hong M.G., Nam B.E., Kim J.G. Effects of different day length and wind conditions to the seedling growth performance of *Phragmites australis* // J. Ecol. Environ. 2021. V. 45. Article No. 9. doi: 10.1186/s41610-021-00184-z

29. Naidoo G. Salt tolerance of the African haplotype of *Phragmites australis* (Poaceae) // Afr. J. Ecol. 2021. V. 59. No. 3. P. 724–734. doi: 10.1111/aje.12876

30. Пьянков В.И. Влияние засоления на мезоструктуру фотосинтетического аппарата тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) в условиях аридной зоны // Экология. 1991. № 4. С. 81–83.

31. Sodani R., Mundiya R. Salinity stress: Its impact on plant growth and development // Agric. Food (E-Newsletter). 2021. V. 3. No. 6. P. 535–537. doi: 10.13140/RG.2.2.24198.09283

32. Li H., Lin W.F., Shen Z.L., Peng H., Zhou J.J., Zhu X.Y. Physiological and proteomic analyses of differ-

ent ecotypes of reed (*Phragmites communis*) in adaptation to natural drought and salinity // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. Article No. 720593. doi: 10.3389/fpls.2021.720593

33. Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н. **Физиология высших водных растений**. Киев: Наукова думка, 1988. 188 с.

References

1. Tsvelev N.N. Poaceae USSR. Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1976. 788 p. (in Russian).

2. Zhigulsky V.A., Shuisky V.F., Chebykina E.Yu., Zhigulskaya D.V. Macrophyte thicket ecosystems in the Neva Bay: a response to hydraulic construction impact // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 88–93. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-088-093

3. Magzanova D.K., Kanieva N.A., Zhuravleva G.F. Application cane southern “*Phragmites australis*” as a raw material in the production of fish feed // Ratsionalnoe pitanie, pishchevye dobavki i biostimulyatory. 2016. No. 2. P. 63–66 (in Russian) [Internet resource] <https://journal-nutrition.ru/ru/article/view?id=35740> (Accessed: 08.07.2023).

4. Honoré M., Lecompte T., Pimbert S. Properties of *Phragmites australis* for insulating concrete application // Construction Technologies and Architecture. 2022. V. 1. P. 332–338. doi: 10.4028/www.scientific.net/CTA.1.332

5. Panov V.V., Kukushkina E.E., Zhenikhov Yu.N., Shakhmatov K.L. Cultivation and use of reed biomass in flooded depleted peat bogs. Materials of the scientific and experimental work. Tver: Triada, 2016. 160 p. (in Russian).

6. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and bio-monitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2013. V. 97. P. 124–130. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.07.017

7. Kumari M., Tripathi B.D. Efficiency of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* for heavy metal removal from wastewater // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 112. P. 80–86. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.10.034

8. Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification // Sci. Total Environ. 2001. V. 281. No. 1–3. P. 87–98. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00838-5

9. Zhao Y., Yang Z., Xia X., Wang F. A shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: incorporating nutrient removal and water evapotranspiration // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5635–5644. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.053

10. Rout N.P., Shaw B.P. Salt tolerance in aquatic macrophytes: possible involvement of the antioxidative enzymes // Plant Science. 2001. V. 160. No. 3. P. 415–423. doi: 10.1016/S0168-9452(00)00406-4

11. Li F., Xie Y., Chen X., Pan Y., Deng Z., Li X. Plant distribution can be reflected by physiological responses to salinity of three submerged macrophytes from the Modern Yellow River Delta // *Fundam. Appl. Limnol.* 2011. V. 179. No. 3. P. 159–167. doi: 10.1127/1863-9135/2011/0179-0159
12. Jampeetong A., Brix H. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans* // *Aquat. Bot.* 2009. V. 91. No. 3. P. 181–186. doi: 10.1016/j.aquabot.2009.05.003
13. Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Hadad H.R., Maine M.A. Adaptability of *Typha domingensis* to high pH and salinity // *Ecotoxicology.* 2011. V. 20. No. 2. P. 457–465. doi: 10.1007/s10646-011-0598-0
14. Touchette B.W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2006. V. 337. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/j.jembe.2006.05.011
15. Hadad H.R., Mufarrege M.M., Di Luca G.A., Maine M.A. Salinity and pH effects on floating and emergent macrophytes in a constructed wetland // *Water Sci. Technol.* 2018. V. 2017. No. 1. P. 270–275. doi: 10.2166/wst.2018.110
16. Papchenkov V.G. Production of water macrophytes and methods of its study // *Hydrobotany: methodology and methods: Proceedings of the School of Hydrobotany.* Rybinsk: Rybinsk Press House, 2003. P. 137–145 (in Russian).
17. Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Kirillov V.V., Bezmaternykh D.M., Mitrofanova E.Yu., Vdovina O.N., Vinokurova G.V., Dolmatova L.A., Sokolova M.I. Factor characteristics of hydrobiocenoses of the small lakes in dry-steppe subband of the Ob-Irtysh interfluvium // *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings.* 2019. No. 8. P. 46–55 (in Russian). doi: 10.25221/levanidov.08.06
18. Zarubina E.Yu., Sokolova M.I. Communication of a specific variety of macrophyte with a morphometry and hydrochemical characteristics of lakes (on example of polytypic river lakes of Burlinsky system, the south of the Ob-Irtysh interfluvium) // *Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia: sbornik nauchnykh statey po materialam XVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* 2018. Barnaul: Izdatel'stvo AltGU. P. 66–70 (in Russian).
19. Zarubina E.Yu., Durnikin D.A. Flora of the salted lakes of the Kulunda Plain (South of West Siberia) // *Siberian Journal of Ecology.* 2005. V. 12. No. 2. P. 341–351 (in Russian).
20. Strakhovenko V.D., Roslyakov N.A., Syso A.I., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Puzanov A.V., Taran O.P. Hydrochemical characteristic of sapropels in Novosibirsk oblast // *Water Resources.* 2016. V. 43. No. 3. P. 336–344 (in Russian). doi: 10.7868/S0321059616030160
21. Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I., Yermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Taran O.P., Boltenev V.V. Genesis of organomineral sediments of lakes of the Central Part of the Baraba Lowland (south of West Siberia) // *Russian Geology and Geophysics.* 2019. V. 60. No. 9. P. 1231–1243 (in Russian). doi: 10.15372/GiG2019093
22. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: system identification techniques. Togliatti: IEVB RAN, 2003. 463 p. (in Russian).
23. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2007. V. 62. No. 2. P. 142–160. doi: 10.1111/j.1574-6941.2007.00375.x
24. Zuur A.F., Ieno E.N., Elphick C.S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems // *Methods Ecol. Evol.* 2010. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x
25. Popolzin A.G. Lakes of the south of the Ob-Irtysh basin. Novosibirsk: Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1967. 350 p. (in Russian).
26. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3. No. 3. P. 346–347. doi: 10.4319/lo.1958.3.3.0346
27. Krotkevich P.G. On the issue of using the water-protective and purification properties of *Phragmites australis* // *Water resources.* 1976. No. 5. P. 191–197 (in Russian).
28. Hong M.G., Nam B.E., Kim J.G. Effects of different day length and wind conditions to the seedling growth performance of *Phragmites australis* // *J. Ecol. Environ.* 2021. V. 45. Article No. 9. doi: 10.1186/s41610-021-00184-z
29. Naidoo G. Salt tolerance of the African haplotype of *Phragmites australis* (Poaceae) // *Afr. J. Ecol.* 2021. V. 59. No. 3. P. 724–734. doi: 10.1111/aje.12876
30. Pyankov V.I. Influence of salinity on the mesostructure of the photosynthetic apparatus of reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) in the arid zone // *Ecology.* 1991. No. 4. P. 81–83 (in Russian).
31. Sodani R., Mundiyyara R. Salinity Stress: Its impact on plant growth and development // *Agric. Food (E-Newsletter).* 2021. V. 3. No. 6. P. 535–537. doi: 10.13140/RG.2.2.24198.09283
32. Li H., Lin W., Shen Z., Peng H., Zhou J., Zhu X. Physiological and proteomic analyses of different ecotypes of reed (*Phragmites communis*) in adaptation to natural drought and salinity // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 12. Article No. 720593. doi: 10.3389/fpls.2021.720593
33. Lukina L.F., Smirnova N.N. Physiology of higher aquatic plants. Kyiv: Naukova Dumka, 1988. 188 p. (in Russian).

Зообентос и зоопланктон малых рек бассейна реки Кобры (национальный парк «Койгородский»)

© 2024. О. А. Лоскутова, к. б. н., с. н. с., О. Н. Кононова, к. б. н., н. с.,
М. А. Батурина, к. б. н., с. н. с., В. И. Пономарев, к. б. н., с. н. с., зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: loskutova@ib.komisc.ru

Исследованы таксономическая структура, количественное развитие зообентоса и зоопланктона двух малых рек – притоков р. Кобры (бассейн р. Волги), участки которых расположены в пределах национального парка «Койгородский». В составе донной фауны обнаружено 87 видов и таксонов более высокого ранга беспозвоночных, среди которых наиболее разнообразными были ручейники (21), подёнки (21), веснянки (13) и олигохеты (12 видов). Выявлены три редких вида из отрядов подёнок, веснянок и стрекоз. Количественное развитие зообентоса сопоставимо со средними показателями для рек Вятского бассейна и обусловлено доминированием хириноид. В биомассе ведущую роль играли пиявки, моллюски и личинки амфибиотических насекомых. Зоопланктон в реках в период исследований представлен 28 таксонами. В планктонной фауне преобладали коловратки и веслоногие раки. В начале вегетационного сезона планктонные сообщества отличались низким видовым разнообразием и количественным развитием. В июле, в период летней межени, зоопланктон был более разнообразен, по численности доминировали коловратки, биомассу образовывали веслоногие раки.

Ключевые слова: национальный парк, малые реки, фауна, водные беспозвоночные, гидрохимия.

Zoobenthos and zooplankton in small rivers of the Kobra River basin (National park “Koygorodsky”)

© 2024. O. A. Loskutova ORCID: 0000-0002-9059-2745, O. N. Kononova ORCID: 0000-0002-7320-4034,
M. A. Baturina ORCID: 0000-0002-6521-6609, V. I. Ponomarev ORCID: 0000-0002-0863-736X,
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: loskutova@ib.komisc.ru

The studies were carried out on two small rivers – tributaries of the Kobra River (the Volga River basin), located on the territory of Koygorodsky National Park. The structure, quantitative development of zoobenthos and fauna of benthic invertebrates were studied. Hydrobiological sampling was carried out in June – July 2021. Standard methods were used for sampling. 87 species and taxa of a higher rank of invertebrates were found in the benthic fauna. The most diverse were caddisflies (21), mayflies (21), stoneflies (13) and oligochaetes (12 species). Quantitative development of the zoobenthos of the Kobra River basin is comparable to the average for the rivers of the Vyatka River basin as a whole and was 19 thous. ind./m² and 74.6 g/m² in the Suran River, and 14.1 thous. ind./m² and 19.2 g/m² in the Mytets River. The chironomids played a leading role in benthic invertebrate communities, and accounted for an average of 26.3–33.4% of the total zoobenthos abundance. Mayfly larvae and leeches dominated in the Suran River by biomass, as well as molluscs and caddisflies – in the Mytets River. The maximum quantitative characteristics were noted on the reaches of both rivers. The development of benthos was much poorer on the riffles. Three rare species from the orders of mayflies, stoneflies and dragonflies were identified.

Zooplankton in the small tributaries of the Kobra River was studied using standard methods: in the Suran River on the early June and in the Mytets River – on the end of the July 2021. Plankton fauna was represented by 28 taxa, rotifers and copepods prevailed. Plankton species diversity, abundance and biomass were lower in the Suran River (the beginning of the vegetation season), which indicated the processes of zooplankton formation. The above indicators were higher in the middle of the summer season in the Mytets River, and indicated the stability of plankton communities.

The presented data significantly expand the understanding of the biodiversity of aquatic ecosystems in the southern taiga zone.

Keywords: national park, small rivers, fauna, aquatic invertebrates, hydrochemistry.

Национальный парк «Койгородский» создан 7 декабря 2019 г. с целью сохранения уникального биологического разнообразия подзоны южной тайги. Национальный парк располагается на юге Республики Коми, на территориях Койгородского и Прилузского административных районов. Исследованные реки – Мытец и Суран – являются основными притоками р. Кобры, впадающей в р. Вятку (бассейн р. Волги). Водосбор р. Мытец занимает больше половины территории национального парка «Койгородский». Чуть менее трети общей площади парка составляет бассейн р. Суран.

В книгах [1, 2] содержатся сведения по фауне беспозвоночных рек сопредельной Республике Коми Кировской области. Преимущественно в материалах конференций [3–10] и статьях [11, 12] опубликованы данные о зообентосе рек бассейна р. Вятки. В этих работах приведены в основном результаты мониторинга экологического состояния рек по количественным показателям зообентоса в тех районах области, где происходило уничтожение химического оружия и, в меньшей степени, уделялось внимание фаунистическим исследованиям.

Сведения о планктонной фауне р. Кобры (на участке, расположенном между с. Синегорье и пос. Красная речка) можно найти в работе [13]. Все приведённые литературные данные касаются либо самой р. Вятки, либо ряда её притоков на территории Кировской области. Зообентос и зоопланктон рек Суран и Мытец, участки которых расположены в пределах национального парка «Койгородский», в Республике Коми ранее не изучались.

Цель работы – характеристика структуры, количественного развития и фауны водных сообществ, выявление новых и редких видов в реках национального парка «Койгородский».

Материалы и методы исследований

Изученные участки рек Суран (59°97.192' с. ш., 50°11.585' в. д.) и Мытец (59°47.414' с. ш., 50°15.694' в. д.) расположены на территории национального парка «Койгородский». По морфологическим параметрам оба водотока относятся к малым рекам. Река Суран (правый приток р. Кобры) протяжённостью 57 км, берет своё начало на территории национального парка и течёт по ненаселённому, частично заболоченному лесному массиву. Ширина русла 5–25 м при глубине до 2 м. Пойма реки местами односторонняя, обычно достигает 30–140 м,

чётко очерчена, коренные берега обрывистые, покрытые смешанным лесом, глинистые. Длина р. Мытец (приток р. Федоровки) составляет 74 км, из которых 25 км расположены на территории национального парка, в восточной его части. Ширина реки здесь достигает 5–15 м. В обеих реках перекаты чередуются с плёсами, тип донных отложений сходен – преимущественно глинисто-песчаные с наилком и детритом грунты. По руслам обеих рек встречаются завалы из упавших в воду деревьев.

Сборы бентоса и зоопланктона проводили на реках Суран (01.06.2021 г.) и Мытец (26.07.2021 г.). Всего собрано и обработано 17 проб зоопланктона и 17 проб зообентоса. Одновременно с отбором гидробиологических проб на тех же станциях производили отбор проб на гидрохимический анализ согласно методическим рекомендациям [14]. Количественный химический анализ проб воды выполнен в экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257) по аттестованным методикам измерений.

Пробы зоопланктона отбирали посредством фильтрации 100 л воды через планктонную сеть Апштейна с размером ячеек 80 мкм. Камеральную обработку осуществляли в лабораторных условиях по стандартным методикам [14]. Индивидуальный вес организмов зоопланктона рассчитывали по формулам [15]: низших раков – Е.В. Балускиной, Г.Г. Винберга, коловраток – J. Ejsmont-Karabin. Для полноты учёта фауны все найденные в пробах виды независимо от их экологических характеристик относили к зоопланктону [16]. Старшевозрастных копепоидов определяли до вида и учитывали вместе со взрослыми животными того же вида, копепоидов младших возрастов и науплиусов не идентифицировали и учитывали как отдельный таксон. Для определения средних значений количественных показателей рассчитывали медиану [17]. Доминантные комплексы выделяли с использованием индекса доминирования Палия-Ковнацки (D_i). Для оценки биологического разнообразия зоопланктона были использованы индексы Шеннона-Уивера, рассчитанного по численности (H_N) и доминирования Симпсона (D) [18].

При отборе проб бентоса с твёрдых грунтов использовали гидробиологический скребок с длиной лезвия 30 см и мешком из мельничного газа с ячейкой 158 мкм. На мягких грунтах пробы отбирали облегчённым дночерпателем Петерсена с площадью захвата 1/40 м². Про-

мывку проб производили через капроновое сито с ячейкой 158 мкм. Все гидробиологические пробы фиксировали 4% водным раствором формальдегида. Обработку проб проводили в камеральных условиях стандартными методами [14]. Одновременно с отбором проб измеряли глубину реки, температуру воды, отмечали характер грунта. Для ряда модельных групп макробеспозвоночных – Oligochaeta, Odonata, Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera – описан полный видовой состав [19]. Для сравнения видовых составов использовали коэффициент общности Чекановского-Съеренсена (I_s) [18].

Результаты и обсуждение

Гидрохимия. По большинству химических показателей вода в исследованных реках была сходна с пресными водами данной территории. По показателям общей минерализации (количеству содержащихся в воде растворённых веществ) исследованные реки можно отнести к гидрокарбонатным водам группы кальция. Наибольших значений (до 300 мг/дм³) минерализация достигала в зимнюю межень – период наивысшей доли подземного питания рек. В летнюю межень она составляла 100–150 мг/дм³ [20]. Цветность воды р. Мытец была невысока (46±9°), вода прозрачная (>30 см). Большая цветность (118±12°) и низкая прозрачность воды (13,2±0,1 см) были отмечены для р. Суран. Водородный показатель (рН) в реках составил 7,4–7,6; электропроводность, мкСм/см – 103±5 (р. Суран) и 234±12 (р. Мытец); взвешенные вещества, мг/дм³ – 7,9±1,4 (р. Суран) и 3,9±0,7 (р. Мытец).

Обычная скорость течения в реках – около 0,2 м/сек. Температура воды в период исследований не превышала 13,2–13,6 °С. Отмеченная по берегам и руслу рек высшая водная растительность представлена кубышкой жёлтой, рдестами, водными мхами.

Зоопланктон. Планктонная фауна в р. Суран в период исследований состояла из девяти таксонов. Наиболее разнообразно были представлены коловратки и веслоногие раки (по четыре таксона), среди ветвистоусых раков был отмечен только *Acroperus harpae* (Baird). Все таксоны, за исключением *Euchlanis deflexa* Gosse, *Proales* sp. и *Bdelloida* ранее находили и в русле р. Кобры [13]. Количественное развитие зоопланктона на исследованном отрезке реки было низким и в среднем составляло 1,2 тыс. экз./м³ и 0,004 г/м³. Наиболее многочисленными в планктонных сообществах

были коловратки (64%), биомассу образовывали веслоногие раки (71%). Доминировали ($10 \leq D_i \leq 100$) в планктоне *Euchlanis dilatata* Ehrenberg и неполовозрелые формы веслоногих раков. Видовое разнообразие зоопланктона (H_N составил 1,8) и уровень доминирования ($D=0,4$) свидетельствовали о продолжающихся процессах формирования зоопланктона, что характерно для малых рек в начале вегетационного сезона [21].

В русле р. Мытец установлено 22 вида и формы, в том числе восемь веслоногих раков, три ветвистоусых рака и 11 коловраток. Среди найденных таксонов только четыре вида – *Eucyclops (Eucyclops) serrulatus* (Fischer), *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller), *E. dilatata* и *E. lyra* Hudson были отмечены ранее для бассейна р. Кобры [13]. Веслоногие раки в р. Мытец представлены подсем. Eucyclopoidea, ветвистоусые – сем. Chydoridae. Все они – обитатели рипали, как заросшей водными макрофитами, так и открытой. Коловратки, как и низшие раки, в большей степени состояли из фитофильных и обитающих в придонном слое воды форм.

Количественное развитие зоопланктона в водах р. Мытец было выше, чем в р. Суран: показатели численности варьировали от 0,09 до 7,15 тыс. экз./м³, биомассы – от 0,002 до 0,047 г/м³. Наиболее многочисленными в планктонных сообществах, как и в р. Суран, были коловратки (67%), биомассу образовывали веслоногие раки (84%). Доминировали в планктоне *E. dilatata* и неполовозрелые формы Cyclopoidea. Планктонные сообщества отличались высоким видовым разнообразием (H_N составил 2,7) и низким уровнем доминирования ($D=0,4$), что свидетельствует об их стабильном состоянии.

Зообентос каждой из исследованных рек бассейна р. Кобры был достаточно разнообразным и включал по 24 группы гидробионтов. В обеих реках в состав донной фауны входили представители мейобентоса – Nematoda, Cladocera, Ostracoda, Copepoda, Tardigrada, Hydracarina, Collembola; и макробентоса – Oligochaeta, Hirudinea, Mollusca, Ephemeroptera, Plecoptera, Coleoptera, Trichoptera, Megaloptera, Chironomidae, Ceratopogonidae, Athericidae, Tabanidae, Psychodidae [19]. Только в р. Суран отмечались двукрылые сем. Limoniidae и Pediciidae и клопы (Heteroptera), исключительно в пробах из р. Мытец были встречены гидры и двукрылые Simuliidae и Tipulidae. В изученных нами реках не были обнаружены представители Porifera, Gordiacea, Isopoda,

Amphipoda и Lepidoptera, которые встречались в зообентосе исследуемого региона ранее, но достаточно редко [9], и их находки ожидаемы при дальнейших исследованиях.

Количественное развитие зообентоса рек бассейна р. Кобры (табл.) в целом сопоставимо со средними показателями численности и биомассы бентоса для рек Вятского бассейна (19,3 тыс. экз./м² и 23,8 г/м²) [9]. В наших исследованиях численность донных животных изменялась от 5,3 до 47,9 тыс. экз./м² в р. Суран, от 8,2 до 165,3 тыс. экз./м² в р. Мытец. Биомасса колебалась от 1,8 до 30,3 г/м² в р. Суран и от 2,6 до 40,0 г/м² в р. Мытец. Более высокие показатели численности бентоса в р. Мытец определялись доминированием, кроме личинок хирономид (26,2%), высокой численностью жуков и ракушковых рачков (в сумме 45,1%), что характерно для времени отбора проб в этом водотоке (конец июля). Биомасса зообентоса в реках различалась в пределах ошибки (табл.).

Численность бентоса в реках Вятского бассейна в значительной мере складывалась за счёт хирономид, олигохет и ракообразных, а основу биомассы составляли моллюски, олигохеты и личинки хирономид [9]. В исследованных нами притоках р. Кобры наблюдались отличия в составе доминирующих групп бентоса по численности и биомассе, что, вероятнее всего, связано со временем отбора проб (начало лета и межень). В обоих водотоках ведущую роль в сообществах донных беспозвоночных играли хирономиды. На их долю приходилось в среднем 26,3–33,4% суммарной численности зообентоса. Кроме личинок хирономид в р. Суран (июнь) отмечалась значительная плотность нематод (15,7%), веслоногих ракообразных (15,3%) и личинок подёнок (12,2%), а в р. Мытец (июль) – остракод (24,9%) и жуков (21,5%). По биомассе в р. Суран доминировали личинки подёнок и пиявки, в р. Мытец – моллюски и ручейники.

Максимальные количественные характеристики зообентоса в обеих реках отмечены на плёсах (р. Суран – 27,4 тыс. экз./м² и 22,4 г/м²; р. Мытец – 112,6 тыс. экз./м² и 23,7 г/м²).

К доминирующим по численности таксонам на плёсах р. Суран относились хирономиды и нематоды (в сумме 52,7%), при преобладании подёнок (36,9%) в общей биомассе. На плёсах в р. Мытец основу численности бентоса составляли остракоды, хирономиды и жуки (в сумме 75%), а 64,8% общей биомассы бентоса приходилось на долю моллюсков и ручейников. На перекатах в обеих реках развитие бентоса было значительно беднее: р. Суран – 16,5 тыс. экз./м² и 1,8 г/м², р. Мытец – 17,5 тыс. экз./м² и 12,5 г/м². При этом в обеих реках на перекатах доминировали по численности хирономиды и подёнки, а в р. Мытец наряду с ними и клещи (в сумме 42,4–59,5%). Основу биомассы бентоса на перекатах р. Суран составляли личинки подёнок и ручейников (в сумме 65%), в р. Мытец – моллюски (86,9%).

В составе модельных групп макрозообентоса рек было выявлено 87 видов и таксонов более высокого ранга. Наиболее разнообразный состав видов описан для ручейников (21), подёнок (21), веснянок (13) и олигохет (12 видов). Наименее представлены в составе фауны отряды стрекоз и вислокрылок, включающих соответственно 4 и 3 таксона [19].

В обеих реках высокой встречаемостью (80–100% проб) отличались подёнки *Ephemera vulgata* Linnaeus и р. *Baetis*, жуки *Oulimnius tuberculatus* (Müller) и *Elmis aenea* (Müller), малощетинковые черви *Nais pseudobtusa* Piguët. Кроме этих таксонов в р. Суран часто (в 60–80% проб) встречались олигохеты *Piguetiella blanci* (Piguët), *Uncinaiis uncinata* (Oersted), подёнки *Caenis horaria* (Linnaeus), ручейники *Hydroptila* sp., *Anobolia laevis* (Zetterstedt), *Polycentropus flavomaculatus* (Pictet), *Mystacides azureus* (Linnaeus) и *Halesus tessellatus* (Rambur); в р. Мытец – олигохеты *N. simplex* Piguët, жуки *Platambus maculatus* (Linnaeus), подёнки *Ceratella ignita* (Poda), ручейники *Hydroptila* sp., *Oxyethira* sp., *Oecetis testacea* (Curtis), мухи *Atherix ibis* (Fabricius). В обеих реках встречены веснянки *Taeniopteryx nebulosa* (Linnaeus) и *Nemurella pictetii* (Klapálek).

При этом часть видов макробеспозвоночных, зарегистрированных ранее для рек Вят-

Таблица / Table

Средняя численность и средняя биомасса зообентоса малых рек бассейна р. Кобры
Average abundance and average biomass of zoobenthos in small rivers of the Kobra River Basin

Водоток Watercourse	Средняя численность, тыс. экз./м ² Average abundance, thous. ind./m ²	Средняя биомасса, г/м ² Average biomass, g/m ²
Суран / Suran	19±8	14±6
Мытец / Mytets	75±35	19±7

ского бассейна [22, 23], но пока не обнаруженных в бассейне р. Кобры, предположительно могут присутствовать и в донной фауне рек Суран и Мытец. Так, для рек Вятского бассейна отмечалось присутствие в водной фауне трёх видов стрекоз [22], из них в настоящее время в притоках р. Кобры обнаружено два – плосконожка обыкновенная *Platycnemis pennipes* (Pallas) и дедка золотистый *Stylurus flavipes* (Chapenter), но список стрекоз бассейна пополнили виды бабка пятнистая *Epitheca bimaculata* (Chapentier) и красотка-девушка *Calopteryx virgo* (Linnaeus). Также в современный список семейств двукрылых этой территории включено 9 семейств: **Simuliidae, Chironomidae, Ceratopogonidae, Limoniidae, Athericidae, Tabanidae, Tipulidae, Psychodidae, Pediciidae.** Не обнаружены пока личинки тенниц (Sciomyzidae) и кровососущих комаров (Culicidae), наличие которых отмечалось в других водотоках бассейна [22]. Впервые для притоков р. Кобры описан видовой состав малоцетинковых червей, веснянок и подёнок [49].

Между двумя реками сходство таксономического состава оценивалось как низкое ($I_s=32\%$). Наиболее вероятной причиной этого можно предположить разные сроки отбора проб – меньшее число таксонов в р. Мытец (48), относительно р. Суран (72), определялось за счёт отсутствия ряда видов амфибиотических насекомых, вылетевших к началу июля.

В составе фауны водных макробеспозвоночных, отмеченных в водотоках на территории Койгородского национального парка, выявлено три редких вида насекомых: *Stylurus flavipes* (Chapenter), *Rhabdiopteryx acuminata* Klapálek, *Habrophlebia lauta* Eaton. Находка стрекозы *Stylurus flavipes* отмечается как вторая на территории Республики Коми [24]. Редкий для фауны Республики Коми вид веснянки *Rh. acuminata* отмечался ранее в регионе, но очень локально [25]. К редким для фауны наших водоёмов видам можно отнести и подёнку *H. lauta*, которая встречается в малых реках Республики Коми на камнях и детрите. Кроме этих видов, большой интерес представляет находка в р. Мытец молодых личинок подёнок р. *Eurylophella*. Представители этого рода в фауне России не указывались с момента описания его в водоёмах Карелии как *Eurylophella karelica* (Tiensuu 1935) [26].

Заключение

Рекам национального парка «Койгородский» присуще значительное разнообразие

водной биоты. Полученные нами сведения о редких видах водной фауны, количественные и качественные показатели зоопланктона и зообентоса закладывают основу системы долгосрочного мониторинга состояния биоразнообразия водных систем национального парка «Койгородский», особо актуального в условиях глобальных изменений климата. Представленные материалы существенно расширяют знания о биологическом разнообразии водных экосистем зоны южной тайги и, в частности, о наименее изученных в этом отношении водных сообществах малых рек в районе водоразделов крупных речных систем бассейнов Каспийского (Волга), Белого (Северная Двина) и Баренцева (Печора) морей. При этом полученная информация о структуре и разнообразии зоопланктона и зообентоса практически незатронутых хозяйственной деятельностью человека водотоков позволяет с новых сторон понять закономерности структурно-функциональной организации водных сообществ и оценить их адаптивный потенциал. Предстоящие в будущем гидробиологические исследования имеют большие перспективы, обещающие интересные и разнообразные находки с позиций последовательной инвентаризации фауны национального парка и решения его уставных задач.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Разнообразие фауны и пространственно-экологическая структура животного населения европейского северо-востока России и сопредельных территорий в условиях изменения окружающей среды и хозяйственного освоения» (рег. № 12204060025-2).

Литература

1. Животный мир Кировской области / Под ред. А.И. Шернина. Киров: Кировский государственный педагогический институт им. В.И. Ленина, 1974. Т. 2. 522 с.
2. Животный мир Кировской области (беспозвоночные животные). Дополнение. Т. 5 / Под ред. Н.М. Алапкиной. Киров: издательство Вятского государственного университета, 2001. 231 с.
3. Кочурова Т.И. Оценка качества воды некоторых рек Кировской области по организмам макрозообентоса // Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: теория, методика, практика: сб. материалов Всеросс. науч. шк. Киров: Вятский государственный гуманитарный университет, 2004. С. 215–217.
4. Кочурова Т.И. Состояние зообентоса р. Вятки и её притоков в окрестностях п. Мирный Оричевского района Кировской области // Актуальные проблемы

регионального экологического мониторинга: научный и образовательный аспекты: сб. материалов Всеросс. науч. шк. Киров: Старая Вятка, 2005. С. 168–171.

5. Кочурова Т.И. Бентофауна реки Вятка и её притоков в зоне защитных мероприятий комплекса объектов хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2008. № 6 (128). С. 18–23.

6. Цепелева М.Л., Кочурова Т.И. Мониторинг рек в зоне влияния объекта по уничтожению химического оружия «Марадыковский» // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: сб. материалов Всеросс. науч.-практ. конф. Ч. 2. Киров: ООО «Лобань», 2009. С. 143–147.

7. Цепелева М.Л. Сезонная динамика зообентоса реки Погиблица // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докл. XVIII Всеросс. молодёж. науч. конф. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2011. С. 138–140.

8. Цепелева М.Л. Зообентос р. Елховка (бассейн р. Волга) в районе Кирово-Чепецкого химического комбината // Экология малых рек в XXI веке: биоразнообразие, глобальные изменения и восстановление экосистем: тез. докл. Всеросс. конф. с междунар. участием. Тольятти: Кассандра, 2011. С. 178.

9. Цепелева М.Л. Зообентос малых рек бассейна р. Вятка (Волжский бассейн) в условиях антропогенного воздействия // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: материалы IV Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2012. Ч. 1. С. 246–250.

10. Цепелева М.Л. Сообщества донных беспозвоночных р. Ивкина (Волжский бассейн) // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докл. XIX Всеросс. молодёж. науч. конф. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2012. С. 106–108.

11. Цепелева М.Л., Шубина В.Н., Кочурова Т.И. Зообентос реки Погиблица в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 39–46. doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-039-046

12. Цепелева М.Л., Шубина В.Н. Оценка качества вод санаторно-курортной реки Ивкина (бассейн р. Вятка) по показателям зообентоса // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 3. С. 36–43. doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-036-043

13. Кононова О.Н. Фауна планктонных животных (Rotifera, Cladocera, Copepoda) некоторых рек Кировской области // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 10. № 2. С. 505–513.

14. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов / Отв. ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовской. М.: Наука, 1975. 240 с.

15. Кононова О.Н., Фефилова Е.Б. Методическое руководство по определению размерно-весовых характеристик организмов зоопланктона европейского

севера России. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 152 с.

16. Протасов А.А. Жизнь в гидросфере. Очерки по общей гидробиологии. Киев: Академперіодика, 2011. 704 с.

17. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 352 с.

18. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М.: Наука, 2005. Кн. 1. 281 с.

19. Loskutova O., Baturina M., Valuyskih Yu. List of meio- and macrozoobenthos groups and species list of macrozoobenthos model groups in the two small rivers of the Cobra river basin (European part of Russia, Komi Republic, National park “Koygorodsky”) // Mendeley Data. 2023. Version 1 [Электронный ресурс] <https://data.mendeley.com/datasets/5ntnb5r8ww/1> (Дата обращения: 05.12.2023). doi: 10.17632/5ntnb5r8ww.1

20. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.

21. Крýлов А.В. Зоопланктон равнинных малых рек. М.: Наука, 2005. 263 с.

22. Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающего придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального значения – национальный парк «Койгородский» в Республике Коми. Т. 1. Эколого-экономическое обоснование национального парка «Койгородский». Сыктывкар, 2018. 176 с.

23. Шихова Т.Г., Митрофанова И.Ю. Пресноводные моллюски верхнего участка Вятско-Камского междуречья // Биология внутренних вод. 2019. № 3. С. 63–72. doi: 10.1134/S0320965219040156

24. Татаринов А.Г., Кулакова О.И. Стрекозы / Фауна европейского северо-востока России. Т. 10. СПб.: Наука, 2009. 213 с.

25. Лоскутова О.А. Веснянки / Фауна европейского северо-востока России. Т. 9. СПб.: Наука, 2006. 224 с.

26. Ozoliņš D., Jēkabsone J., Skuja A., Timm H. New records of a poorly studied mayfly species, *Eurylophella karelica* Tiensuu, 1935 (Ephemeroptera, Ephemerellidae), in the Baltic Ecoregion // Check List. 2017. V. 13. No. 4. P. 349–353. doi: 10.15560/13.4.349

References

1. Animal world of the Kirov region / Ed. A.I. Shernin. Kirov: Kirovskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy institut im. V.I. Lenina, 1974. V. 2. 522 p. (in Russian).

2. Animal world of the Kirov region (invertebrates). Addition. V. 5 / Ed. N.M. Alalykin. Kirov: izdatelstvo Vyatskogo gospeduniversiteta, 2001. 231 p. (in Russian).

3. Kochurova T.I. Assessment of water quality of some rivers of the Kirov region by zoobenthos organisms // Actual problems of regional environmental monitoring: theory, methodology, practice: Sbornik materialov Vser-

ossiyskoy nauchnoy shkoly. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy gumanitarnyy universitet, 2004. P. 215–217 (in Russian).

4. Kochurova T.I. The state of the zoobenthos of the Vyatka river and its tributaries in the vicinity of Mirny village, Orichesky district, Kirov region // Actual problems of regional environmental monitoring: scientific and educational aspects: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly. Kirov: Staraya Vyatka, 2005. P. 168–171 (in Russian).

5. Kochurova T.I. Bentofauna of the Vyatka River and its tributaries in the zone of protective activities of the complex of objects of storage and destruction of chemical weapons “Maradykovsky” // Vestnik IB Komi NTs UrO RAN. 2008. No. 6 (128). P. 18–23 (in Russian).

6. Tsepeleva M.L., Kochurova T.I. Monitoring of rivers in the zone of influence of the facility for the destruction of chemical weapons “Maradykovsky” // Problems of regional ecology in the conditions of sustainable development: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-practicheskoy konferentsii. Part 2. Kirov: OOO “Loban”, 2009. P. 143–147 (in Russian).

7. Tsepeleva M.L. Zoobenthos seasonal dynamics in the Pogiblitza River // Actual problems of biology and ecology: Materialy dokladov XVIII Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 2011. P. 138–140 (in Russian).

8. Tsepeleva M.L. Zoobenthos of the Elkhovka River (the Volga river basin) in the area of the Kirovo-Chepetsk chemical plant // Ecology of small rivers in the 21st century: biodiversity, global changes and revival of ecosystems: Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Tolyatti: Kassandra, 2011. P. 178 (in Russian).

9. Tsepeleva M.L. Zoobenthos of small rivers of the Vyatka river basin (the Volga river basin) under anthropogenic impact // Ecological problems of northern regions and ways for their solution: Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Part 1. Apatity: Izdatelstvo Kolskogo NTs RAN, 2012. P. 246–250 (in Russian).

10. Tsepeleva M.L. Communities of benthic invertebrates of the Ivkina River (the Volga river basin) // Actual problems of biology and ecology: Materialy dokladov XIX Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 2012. P. 106–108 (in Russian).

11. Tsepeleva M.L., Shubina V.N., Kochurova T.I. Zoobenthos of the Pogiblitza River in the vicinity of the chemical weapons decommission plant “Maradikovsky” // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 3. P. 39–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-039-046

12. Tsepeleva M.J.L., Shubina V.N. Assessment of water quality of the Ivkina river near the health resort area (basin of the Vyatka river) as for zoobenthos // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 3. P. 36–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-036-043

13. Kononova O.N. Fauna of planktonic intervertebrates (Rotifera, Cladocera, Copepoda) some rivers of the Kirov area // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2008. V. 10. No. 2. P. 505–513 (in Russian).

14. Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies / Ed. F.D. Mordukhay-Boltovskoy. Moskva: Nauka, 1975. 240 p. (in Russian).

15. Kononova O.N., Fefilova E.B. Methodological guidelines for the determination of dimensional and weight characteristics of zooplankton organisms in the European North of Russia. Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2018. 152 p. (in Russian).

16. Protasov A.A. Life in Hydrosphere. Sketches on general Hydrobiology. Kiev: Akademiya, 2011. 704 p. (in Russian).

17. Lakin G.F. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).

18. Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: methods, criteria, solutions. Book 1. Moskva: Nauka, 2005. 281 p. (in Russian).

19. Loskutova O., Baturina M., Valuyskiy Yu. List of meio- and macrozoobenthos groups and species list of macrozoobenthos model groups in the two small rivers of the Cobra river basin (European part of Russia, Komi Republic, National park “Koygorodsky”) // Mendeley Data. 2023. V. 1 [Internet recourse] <https://data.mendeley.com/datasets/5ntnb5r8ww/1> (Accessed: 05.12.2023). doi: 10.17632/5ntnb5r8ww.1

20. Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology. Moskva: Drofa; DiK, 1997. 116 p. (in Russian).

21. Krylov A.V. Zooplankton of lowland small rivers. Moskva: Nauka, 2005. 263 p. (in Russian).

22. Materials of a complex ecological survey of the territory sections, justifying the granting of the legal status of specially protected natural territory of federal significance to this territory – the National Park “Koygorodsky” in the Komi Republic. V. 1. Ecological and economic justification of the national park “Koygorodsky”. Syktyvkar, 2018. 176 p. (in Russian).

23. Shikhova T.G., Mitrofanova I.Yu. Freshwater molluscs of the Vyatka-Kama watershed // Inland Water Biology. 2019. No. 3. P. 63–72 (in Russian). doi: 10.1134/S0320965219040156

24. Tatarinov A.G., Kulakova O.I. Dragonflies / Fauna of the European North-East of Russia. V. 10. Sankt-Peterburg: Nauka, 2009. 213 p. (in Russian).

25. Loskutova O.A. Stoneflies / Fauna of the European North-East of Russia. V. 9. Sankt-Peterburg: Nauka, 2006. 224 p. (in Russian).

26. Ozoliņš D., Jēkabsons J., Skuja A., Timm H. New records of a poorly studied mayfly species, *Eurylophella karelica* Tiensuu, 1935 (Ephemeroptera, Ephemerellidae), in the Baltic Ecoregion // Check List. 2017. V. 13. No. 4. P. 349–353. doi: 10.15560/13.4.349

Влияние плотности посадки на личиночное развитие камышовой жабы (*Epidalea calamita*) (по результатам лабораторных исследований)

© 2024. А. А. Кидов¹, д. б. н., зав. кафедрой,
Р. А. Иволга¹, ассистент, Т. Э. Кондратова¹, ассистент,
О. С. Грода², лаборант, В. В. Демьянчик², н. с.,
В. О. Ерашкин¹, лаборант, Е. А. Кидова¹, инженер,

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,
127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49,

²Полесский аграрно-экологический институт Национальной академии наук Беларуси,
224030, Белоруссия, г. Брест, ул. Советских Пограничников, д. 41,
e-mail: kidov@rgau-msha.ru

Камышковая жаба (*Epidalea calamita*) широко распространена в Европе, однако повсеместно сокращает свою численность, особенно на севере и востоке ареала. В работе представлены результаты изучения влияния начальной плотности посадки на выживаемость, длительность развития и размеры личинок *E. calamita* в лабораторных условиях. Использовали контейнеры с одинаковой площадью дна (1092 см²), но с разным уровнем воды (14 и 28 см). Молодь выращивали при разной плотности посадки на единицу объема воды (1–3 экз./л) и единицу площади дна (82,4–494,5 экз./м²). При всех вариантах выращивания личинки имели очень высокую выживаемость (90,7–100,0%). С повышением плотности на единицу объема воды и на площадь дна длительность личиночного развития увеличивалась. Наблюдалась отрицательная корреляция размеров тела с начальной плотностью посадки личинок на объем воды ($r=-0,52$) и на площадь дна ($r=-0,62$). На длительность личиночного развития и длину тела молодых жаб плотность посадки личинок на площадь дна оказывала значимо большее влияние, чем плотность на единицу объема воды. Авторы отмечают, что в лабораторных условиях целесообразно выращивать личинок *E. calamita* при максимальной плотности посадки (3 экз./л и 494,5 экз./м²), так как это позволяет получать большее количество молодых жаб.

Ключевые слова: зоокультура, лабораторное размножение, бесхвостые земноводные, плотность, выживаемость.

Effect of stocking density on larval development of the Natterjack toad (*Epidalea calamita*), based on the laboratory results

© 2024. A. A. Kidov¹ ORCID: 0000-0001-9328-2470, R. A. Ivolga¹ ORCID: 0000-0003-2050-5279,
T. E. Kondratova¹ ORCID: 0000-0001-7533-7327, O. S. Groda² ORCID: 0009-0006-6880-3979,
V. V. Demyanchik² ORCID: 0009-0007-4219-1481, V. O. Erashkin¹ ORCID: 0000-0003-1589-6340,
E. A. Kidova¹ ORCID: 0000-0003-3933-0499

¹Russian State Agrarian University – MTAА,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127434,

²The Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
41, Sovetskikh Pogranichnikov St., Brest, Belarus, 224030,
e-mail: kidov@rgau-msha.ru

The Natterjack toad (*Epidalea calamita*) is widespread in Europe, but it is reducing in numbers, especially in the north and east of its range. The paper presents the results of studying the effect of initial stocking density on survival, development duration and body length of *E. calamita* larvae in laboratory conditions. The experiments used containers with the same bottom area (1092 cm²), but with different water levels (14 and 28 cm). Larvae were grown at different stocking densities per unit volume (1–3 larvae/L) of water and per unit area of the bottom (82.4–494.5 larvae/m²). The studied larvae have very high survival rate (90.7–100.0%) and show no differences in this parameter in groups in all variants of cultivation. Animals from the lowest density groups were characterized by the shortest developmental duration. With an increase in the stocking density per unit volume of water and bottom area the larval development duration increased. There was a negative correlation of body length with the initial stocking density per unit volume of water ($r=-0.52$) and bottom area ($r=-0.62$). The stocking density per the bottom area affected greater the larval developmental duration and

body length of juvenile toads, than the stocking density per unit water volume. The authors note that it is advisable to grow *E. calamita* larvae in laboratory conditions at maximum stocking density (3 larvae/L and 494.5 larvae/m²), as this allows for a greater number of juvenile toads.

Keywords: zooculture, captive breeding, tailless amphibians, density, survival.

Начальная плотность генерации является одним из важнейших факторов, обуславливающих рост, длительность развития и выживаемость личинок земноводных [1, 2]. Помимо конкуренции за ресурсы, увеличение числа особей способствует накоплению экзотоксинов, тормозящих рост [3, 4]. Традиционно плотность размещения личинок амфибий рассчитывают на единицу объёма [5–8], значительно реже – на площадь дна [9]. Вполне вероятно, что первая оценка имеет наибольшее значение для преимущественно пелагических личинок, а вторая – для бентосных. Однако влияние на личиночное развитие возрастания плотности посадки в объёме воды может косвенно свидетельствовать не столько о видовых особенностях использования пространства, сколько о чувствительности животных к концентрации в воде продуктов обмена. Например, у широко распространённой и хорошо изученной зелёной жабы (*Bufo viridis*) личинки питаются со дна, однако наибольшее влияние на их рост и развитие оказывает именно объём воды [9]. Установление влияния плотности посадки на показатели личиночного развития (выживаемость и длительность развития до метаморфоза, размеры при выходе на сушу) является актуальной задачей для последующей разработки технологии культивирования редких и исчезающих видов земноводных [10].

Камышовая жаба (*Epidalea calamita* (Laurenti, 1768)) принадлежит к наиболее широко распространённым в Западной и Центральной Европе амфибиям, однако на большей части территории сокращается в численности. Особенно заметны негативные тенденции в состоянии вида на восточной и северной перифериях ареала [11, 12], включая Россию и Белоруссию [13, 14]. В России *E. calamita* известна только по старым (до конца 1980-х гг.) местам находок в Калининградской области [14], в связи с чем внесена в федеральную Красную книгу [15]. По всей видимости, сохранение вида в стране уже невозможно без применения специальных мер, включая разведение в искусственных условиях и последующую реинтродукцию в восстановленные местообитания [16]. К настоящему времени разработана методика лабо-

раторного получения потомства от камышовой жабы [17], и последующим этапом в создании устойчивой зоокультуры этого вида должен стать подбор условий выращивания, обеспечивающих наиболее высокие показатели роста, развития и выживаемости [10].

Ранее на особях этого вида проводили исследования по влиянию плотности посадки на показатели личиночного развития [18], но авторами были созданы экстремальные условия (плотность составляла от 4 до 32 экз./л при размещении 56,6–452,9 экз./м²), приводившие к повышенной элиминации, что не позволяет использовать полученные ими данные для успешного лабораторного выращивания.

Целью настоящего исследования являлось установление влияния плотности посадки личинок камышовой жабы на единицу объёма воды и площади дна при выращивании в искусственно созданной среде обитания.

Объекты и методы исследования

В исследованиях задействовали потомство от одной пары камышовых жаб из окрестностей г. Бреста (Белоруссия). Яйца получали в искусственных условиях при помощи гормональной стимуляции нереста по многократно апробированной схеме [19, 20]. Личинок после начала экзогенного питания рассаживали в наполненные отстоянной водой полипропиленовые контейнеры марки Samla (производитель – ИКЕА, Россия) размером 39×28×14 см и 39×28×28 см. Таким образом, оба типа контейнеров имели равную площадь дна (1092 см²), но разный уровень водного столба (14 и 28 см соответственно), что позволяло добиваться разной плотности посадки животных на единицу площади при равной плотности на единицу объёма и наоборот (табл. 1). Каждый вариант выращивания осуществляли в двукратной повторности.

Температура воды в период исследований колебалась в пределах 19,0–22,5 °С, составляя в среднем за 80 сут 21,2±1,3 °С. Личинок ежедневно кормили вволю хлопьевидными полнорационными кормами для рыб «TetraMin Flakes» (производитель – Tetra GmbH, Германия) с добавлением размороженных листьев шпината и ошпаренных кипятком

Таблица 1 / Table 1

Начальная плотность посадки личинок *Epidalea calamita* на единицу объёма воды и площади дна в разных экспериментальных группах / Initial stocking density of *Epidalea calamita* larvae per unit of water volume and bottom area in different experimental groups

Номер группы Group number	Плотность посадки Stocking density		Полезный объём воды в контейнере, л Useful water volume in container, L	Количество личинок в одном контейнере, экз. Number of larvae in one container, ind.
	экз./л larvae/L	экз./м ² larvae/m ²		
1	1	82,4	9	9
2	2	164,8	9	18
3	3	247,3	9	27
4	0,5	82,4	18	9
5	1	164,8	18	18
6	1,5	247,3	18	27
7	2	329,6	18	36
8	3	494,5	18	54

листьев крапивы. Замену 2/3 объёма воды на отстоянную водопроводную того же состава осуществляли через день. Принудительной аэрации и фильтрации не использовали.

При выходе молоди на сушу после прорыва передних конечностей и резорбции хвоста (47 стадия по таблице нормального развития Госнера [21]) оценивали длительность личиночного развития, выживаемость и длину тела (L).

Статистическую обработку и визуализацию полученных данных выполняли в программе OriginPro 2022. Рассчитывали среднюю арифметическую и стандартное отклонение ($M \pm SD$), а также размах (min–max) исследуемых признаков. Гипотезы о нормальности и гомогенности распределения выборок проверяли с помощью критериев Лиллиефорса и Левена. Статистическую значимость наблюдаемых различий оценивали при помощи однофакторного дисперсионного анализа (F), а при попарном сравнении использовали тест Тьюки (Q-value). Взаимосвязь между длительностью личиночного развития и длиной тела определяли расчётом коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r). Для характеристики влияния мультиколлинеарных ($r=0,79$, $p<0,05$) факторов (начальная плотность посадки на объём воды и площадь дна) на длительность личиночного развития и морфометрические показатели молоди камышовой жабы использовали регрессионный анализ.

Результаты и обсуждение

При всех вариантах выращивания личинки характеризовались очень высокой выживаемостью до метаморфоза (90,7–100,0%) и не

имели отличий по этому показателю в группах с различной плотностью посадки ($F_{7,8}=3,258$; $p=0,060$) (табл. 2).

Длительность личиночного развития различалась у разных групп статистически значимо ($F_{7,373}=19,928$; $p \leq 0,001$). Наименьшей продолжительностью развития характеризовались животные из групп с наименьшей плотностью посадки. С повышением плотности как на объём воды ($r=0,52$; $p<0,05$), так и на площадь дна ($r=0,57$; $p<0,05$), длительность личиночного развития увеличивалась (рис. 1).

Средние размеры выходящих на сушу молодых жаб статистически значимо различались в группах с разной плотностью посадки личинок ($F_{7,373}=42,440$; $p \leq 0,001$). Наблюдалась отрицательная корреляция размеров тела выходящей на сушу молоди с начальной плотностью посадки личинок на объём воды ($r=-0,52$, $p<0,05$) и на площадь дна ($r=-0,62$, $p<0,05$). Наиболее крупные особи (средняя длина тела более 11 мм) выходили на сушу из контейнеров, где была низкая плотность посадки личинок, а самые мелкие (средняя длина тела менее 10 мм) в контейнерах с наибольшей плотностью (табл. 2). Статистически значимая корреляция между продолжительностью личиночного развития и размерами тела молоди при выходе на сушу была отмечена только в группах 3 ($r=0,39$, $p<0,05$), 5 ($r=0,58$, $p<0,05$), 6 ($r=0,28$, $p<0,05$) и 7 ($r=0,42$, $p<0,05$).

В целом, на длительность личиночного развития и длину тела молоди *E. calamita* при выходе на сушу начальная плотность посадки личинок на площадь дна оказывала значимо большее влияние, чем плотность на единицу объёма воды (стандартизированный коэффициент Beta равнялся, соответственно,

Таблица 2 / Table 2

Показатели личиночного развития *Epidalea calamita* при различной плотности посадки
 Indicators of *Epidalea calamita* larval development at different stocking density

Номер группы Group number	Повторность Replicate	Выживаемость, % Survival, %	Длительность личиночного развития, сутки Larval developmental duration, days		Длина тела при выходе на сушу, мм Larval length at land emergence, mm	
			M±SD	min-max	M±SD	min-max
1	1	100	50±4	45-57	10,7±0,5	9,56-11,12
	2	100	47±2	43-51	11,2±0,6	10,43-12,11
	среднее average	100	49±3	43-57	10,9±0,6	9,56-12,11
2	1	100	51±4	46-59	10,4±0,8	8,74-11,57
	2	100	50±6	44-67	10,4±0,7	9,17-11,91
	среднее average	100	51±5	44-67	10,4±0,7	8,74-11,91
3	1	96,3	53±5	44-63	10,0±0,5	9,02-11,24
	2	85,2	50±4	45-59	10,1±0,6	8,96-11,33
	среднее average	90,8	52±4	44-63	10,0±0,6	8,96-11,33
4	1	100	45±2	42-47	11,3±0,5	10,77-12,16
	2	100	44±2	42-49	11,3±0,4	10,68-11,63
	среднее average	100	44±2	42-49	11,3±0,4	10,68-12,16
5	1	100	48±3	43-53	10,3±0,6	9,18-11,34
	2	94,4	49±4	44-59	10,2±0,5	9,12-11,04
	среднее average	97,2	48±4	43-59	10,2±0,6	9,12-11,34
6	1	88,8	51±4	45-63	10,3±0,5	9,09-11,84
	2	92,6	50±5	45-71	10,0±0,8	8,54-11,69
	среднее average	90,7	51±5	45-71	10,1±0,7	8,54-11,84
7	1	94,4	53±6	45-70	9,9±0,6	8,76-11,10
	2	94,4	53±5	46-65	10,0±0,7	8,88-11,75
	среднее average	94,4	53±6	45-70	9,9±0,7	8,76-11,75
8	1	100	56±6	46-66	9,4±0,7	7,93-10,76
	2	100	60±8	48-80	8,9±0,7	7,91-11,10
	среднее average	100	58±8	46-80	9,2±0,7	7,91-11,76

0,455 и 0,136 для длительности личиночного развития, -0,570 и -0,090 для длины тела). При увеличении начальной плотности посадки на 100 экз./м² дна длительность личиночного развития увеличивалась на 2,76±0,21 сут ($p \leq 0,001$; $R^2 = 0,316$), а длина тела уменьшалась на 0,410±0,025 мм ($p \leq 0,001$; $R^2 = 0,417$) (рис. 2).

Таким образом, увеличение плотности посадки в апробированных нами значениях не оказывало влияния на выживаемость личинок камышовой жабы в отличие от большинства других исследований на бесхвостых земно-

водных [22–24]. Вероятно, это обусловлено адаптацией *E. calamita* к размножению в эфемерных водоёмах, в которых, по мере высыхания, число личинок на единицу объёма и площади постоянно возрастает.

Длительность личиночного развития камышовой жабы в большинстве опытных групп была близкой к отмеченной у этого вида в природе (42–50 сут [25] или 45–60 сут [26]) и лаборатории (от 47–69 [17] до 80 сут [18]).

В то же время, повышение плотности способствовало значимому увеличению длитель-

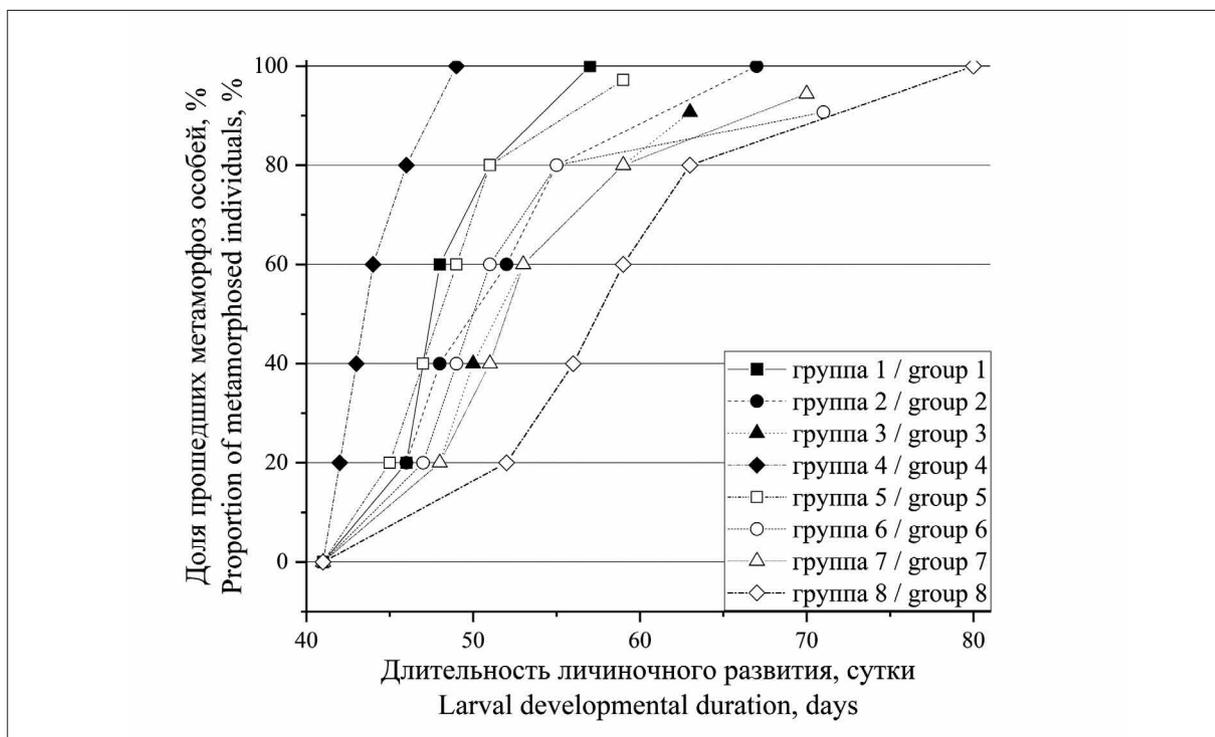


Рис. 1. Динамика выхода на сушу молоди *Epidalea calamita* в разных экспериментальных группах в течение эксперимента (описания групп указаны в таблице 1)
 Fig. 1. Dynamics of juvenile *Epidalea calamita* land emergence in different experimental groups in the experiment (group descriptions are given in table 1)

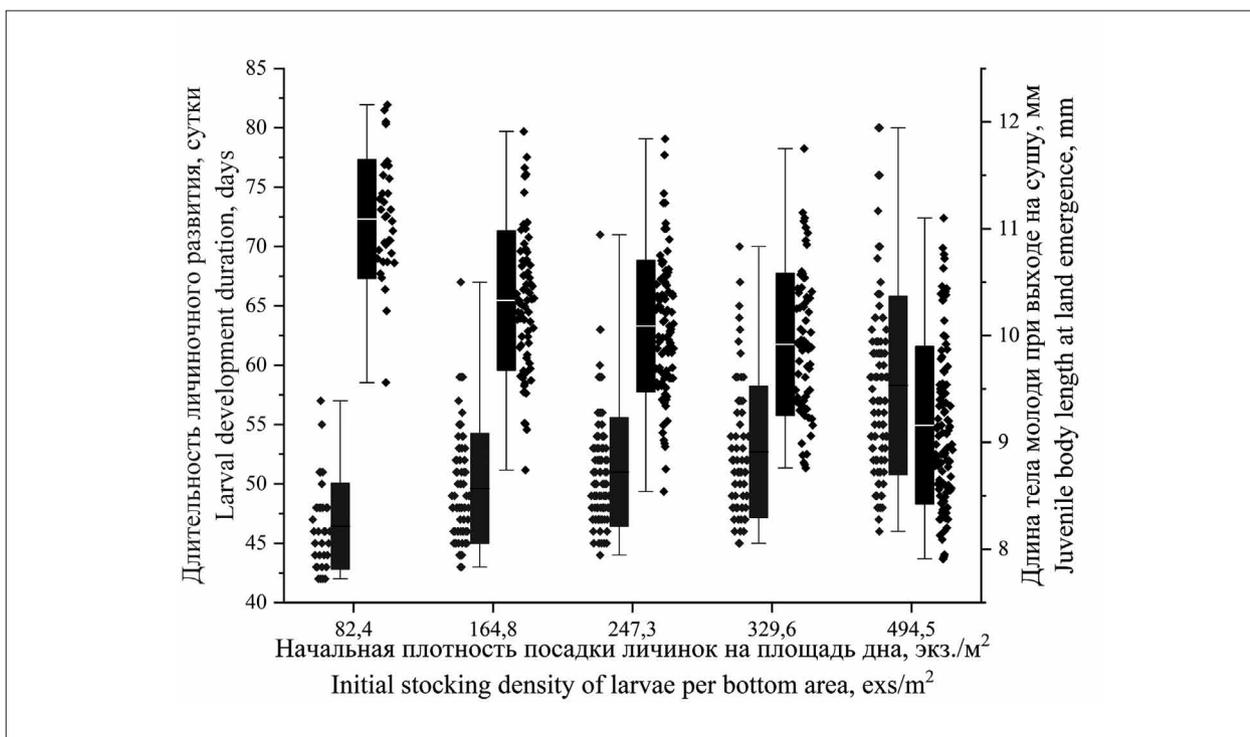


Рис. 2. Длительность личиночного развития и длина тела молоди *Epidalea calamita* в зависимости от начальной плотности посадки на площадь дна
 Fig. 2. Larval development duration and body length of juvenile *Epidalea calamita* depending on initial stocking density per bottom area

ности личиночного развития. Традиционно эту зависимость в природных водоёмах объясняют обостряющейся конкуренцией за пищевые ресурсы [27], однако в условиях эксперимента все личинки постоянно имели доступ к корму. Многие авторы отмечают [6, 18, 22, 23], что темпы роста личинок отрицательно коррелируют с интенсивностью конкуренции, вызываемой, в том числе, высокой плотностью, даже при изобильном питании. Всегда отмечаются личинки, демонстрирующие наиболее активный рост, но тормозящие развитие конспецификов из той же популяции за счёт экзометаболитов [3, 4]. По всей видимости, именно этой причиной должна объясняться задержка в личиночном развитии *E. calamita* при повышении плотности посадки.

Длина тела молодых жаб, полученных в настоящем исследовании (8,74–12,16 мм), в целом соответствует данным, приводимым в других работах (9,60–10,40 мм [17] и 10,86–11,74 мм [28]), но размах этого показателя был выше. Средние размеры выходящей на сушу молоди уменьшались с увеличением плотности посадки личинок, что отмечалось и для других буфонид [6, 9]. Предыдущими исследователями было показано [29, 30], что размер молоди амфибий не влияет на выживаемость после метаморфоза в течение короткого периода (3 месяца), однако мелкие особи в последующем имеют меньшую скорость роста, требуют больших затрат корма на прирост массы в сравнении со своими более крупными конспецификами и не способны догнать их по размерам [30]. Тугорослые экземпляры могут затрачивать больше энергии в период зимовки, что обуславливает их более высокую элиминацию [31]. Затянутый личиночный период также может повлиять на выживаемость молоди во время гибернации из-за позднего метаморфоза и недостатка времени для накопления необходимого количества питательных веществ перед зимовкой [32]. Небольшие размеры молоди в дальнейшем могут повлиять на возраст достижения половой зрелости и плодовитость самок [33–35].

Предыдущие исследователи отмечали [18], что при выращивании личинок *E. calamita* с относительно низкой плотностью посадки (4 и 8 экз./л) размер тела молоди при выходе на сушу был обратно пропорционален продолжительности личиночного периода (соответственно, $r=-0,541$, $p<0,0003$ и $r=-0,369$, $p<0,02$), но при дальнейшем повышении плотности (16 экз./л) тренд приобретает боковой характер ($r=-0,054$), затем (при 32 экз./л)

продолжает развиваться противоположная тенденция ($r=0,415$, $0,10<p<0,15$). По нашим данным, в половине опытных групп длина тела молоди достоверно зависела от длительности их личиночного развития, а в других также отмечена такая тенденция, не получившая, однако, статистического подтверждения. Таким образом, наиболее крупные жабы чаще проходили метаморфоз одними из последних в своих группах.

Интересно, что повышение плотности посадки на площадь дна влияло на показатели личиночного развития *E. calamita* сильнее, чем повышение плотности на единицу объёма воды. Ранее это явление не отмечалось для настоящих жаб [9]. Вероятно, адаптированные к развитию при высокой плотности посадки в эфемерных водоёмах, личинки камышовой жабы обладают высокой устойчивостью к продуктам обмена конспецификов, что делает объём воды для них менее значимым в сравнении с площадью дна, на котором они проводят большую часть времени.

Оценка воздействия повышения плотности размещения на личинок разных видов земноводных важна для прогнозирования последствий глобального изменения климата, так как увеличение среднегодовых температур вместе с сокращением количества осадков [36, 37] приводит к исчезновению или сокращению периода существования водоёмов, пригодных для размножения. Это способствует перенаселённости оставшихся местообитаний, в которых возрастает внутри- и межвидовая конкуренция.

Заключение

Экстраполируя полученные результаты наших и других лабораторных исследований на природные условия, можно заключить, что увеличение плотности посадки при усиливающейся аридизации будет способствовать повышенной смертности личинок *E. calamita* при раннем пересыхании водоёмов в связи со значительным удлинением периода развития в воде. Также выходящие при этом мелкие молодые жабы могут массово погибать в первую зимовку, а в последующем будут поздно созревать и иметь пониженную плодовитость, что негативно скажется на состоянии популяций.

В то же время, при разведении в искусственных условиях для последующей реинтродукции, кладки яиц можно получать до периода размножения в природе (например, в зимние месяцы), выращивать личинок при максимальной из апробированных нами плотностей посадки (3 экз./л и 494,5 экз./м²) и выпускать

молодь в природу уже весной, задолго до природных сроков метаморфоза, что позволит молодым жабам набрать необходимую массу к первой зимовке и увеличить выживаемость.

Работа выполнена за счёт средств Программы развития РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Литература

1. Шварц С.С., Пястолова О.А., Добринская Л.А., Рункова Г.Г. Эффект группы в популяциях водных животных и химическая экология. М.: Наука, 1976. 152 с.
2. Ляпков С.М., Северцов А.С. Влияние начальной численности генерации на численность завершивших метаморфоз особей, их размеры и сроки выхода у травяной (*Rana temporaria*) и остромордой (*R. arvalis*) лягушек // Зоологический журнал. 1994. Т. 73. № 1. С. 97–112.
3. Шварц С.С., Пястолова О.А. Регуляторы роста и развития личинок земноводных. I. Специфичность действия // Экология. 1970. № 1. С. 77–82.
4. Роус С., Роус Ф. Выделение головастиками веществ, задерживающих рост // Механизмы биологической конкуренции. М.: Мир, 1964. С. 263–276.
5. Немыко Е.А., Кидов А.А., Вяткин Я.А. Рост, развитие и выживаемость личинок кавказского тритона, *Lissotriton lantzi* при различной плотности посадки в зоокультуре // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2019. № 1 (25). С. 113–125. doi: 10.21685/2307-9150-2019-1-12
6. Hartel T. An experimental study on density effects on tadpole growth, mortality and metamorphosis in yellow-bellied toad *Bombina variegata* // Biota. 2007. V. 8. No. 1-2. P. 27–34.
7. Munguia-Fragozo P.V., Alatorre-Jacome O., Aguirre-Becerra H., García-Trejo J.F., Soto-Zarazúa G.M., Rico-García E. Growth and metabolic effects of stocking density in bullfrog tadpoles (*Rana catesbeiana*) under greenhouse conditions // Int. J. Agric. Biol. 2015. V. 17. No. 4. P. 711–718. doi: 10.17957/IJAB/14.0002
8. Newman R.A. Ecological constraints on amphibian metamorphosis: Interactions of temperature and larval density with responses to changing food level // Oecologia. 2022. V. 115. No. 1-2. P. 9–16. doi: 10.1007/s004420050485
9. Кидов А.А., Иволга Р.А., Кондратова Т.Э., Соколова А.Д. Влияние начальной плотности на личиночное развитие зелёной жабы (*Bufo viridis*, Amphibia, Anura, Bufonidae) в лабораторных условиях // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2022. Т. 8. № 3. С. 68–76.
10. Кидов А.А., Кидова Е.А., Дроздова Л.С., Вяткин Я.А., Иволга Р.А., Кондратова Т.Э., Аффрин К.А., Иванов А.А. Обзор методик зоокультуры редких и исчезающих земноводных России и сопредельных стран: опыт

Тимирязевской академии // Труды Института зоологии РК. 2021. Т. 1. Вып. 1. С. 89–104. doi: 10.54944/oc260ot24

11. Beebee T., Cabido C., Eggert C., Mestre I.G., Iraola A., Garin-Barrio I., Griffiths R.A., Miao C., Oromi N., Sanuy D., Sinsch U., Tejedo M. 40 years of natterjack toad conservation in Europe // FrogLog. 2012. V. 101. P. 40–44.
12. Rannap R. Boreal Baltic coastal meadow management for *Bufo calamita* // Coastal meadow management – best practice guidelines. The Experience of LIFE-Nature Project “Boreal Coastal Meadow Preservation in Estonia” / Eds. R. Rannap, L. Briggs, K. Lotman, I. Lepik, V. Rannap. Tallinn: Ministry of the Environment of the Republic of Estonia, 2004. P. 26–33.
13. Пикулик М.М. Земноводные Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1985. 153 с.
14. Кузьмин С.Л. Земноводные бывшего СССР. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 370 с.
15. Кузьмин С.Л. Камышовая жаба, *Epidalea calamita* (Laurenti, 1768) // Красная книга Российской Федерации, том Животные. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. С. 423–424.
16. Uteshev V.K., Gakhova E.N., Kramarova L.I., Kaurova S.A., Kidova E.A., Kidov A.A., Browne R.K. Russian collaborative development of reproduction technologies for the sustainable management of amphibian biodiversity // Asian Herpetological Research. 2023. V. 14. No. 1. P. 103–115. doi: 10.16373/j.cnki.ahr.220043
17. Kidov A.A., Kondratova T.E., Ivolga R.A., Kidova E.A. Reproductive characteristics of the natterjack toad (*Epidalea calamita*, Amphibia, Bufonidae) in laboratory conditions // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2023. V. 50. No. 7. P. 1567–1572. doi: 10.1134/S1062359023070129
18. Tejedo M., Reques R. Effects of egg size and density on metamorphic traits in tadpoles of the natterjack toad (*Bufo calamita*) // J. Herpet. 1992. V. 26. No. 2. P. 146–152. doi: 10.2307/1564855
19. Kidov A.A., Matushkina K.A., Uteshev V.K., Timoshina A.L., Kovrina E.G. The first captive breeding of the Eichwald’s toad (*Bufo eichwaldi*) // Russian Journal of Herpetology. 2014. V. 21. No. 1. P. 40–46. doi: 10.30906/1026-2296-2014-21-1-40-46
20. Kidov A.A., Ivolga R.A., Kondratova T.E., Kidova E.A. Features of reproduction and early development in the Batura toad (*Bufo baturae*, Amphibia, Bufonidae), the most high-montaine amphibian in the former Soviet Union, based on the results of a laboratory study // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2022. V. 49. No. 9. P. 1387–1397. doi: 10.1134/S106235902209014X
21. Gosner K.L. A simplified table for staging Anuran embryos and larvae with notes on identification // Herpetologica. 1960. V. 16. No. 3. P. 183–190.
22. Martínez I.P., Álvarez R., Herráez M.P. Growth and metamorphosis of *Rana perezi* larvae in culture: Effects of larval density // Aquaculture. 1996. V. 142. No. 3–4. P. 163–170. doi: 10.1016/0044-8486(96)01257-4
23. Godome T., Tossavi C.E., Djissou A.S.M., Zounon Y., Ouattara I.N., Fiogbe E.D. Effect of stocking density on the survival and growth of *Hoplobatrachus occipitalis*

(Günther, 1858) (Amphibia: Dicroglossidae) of tadpoles reared in ponds from Benin // International Journal of Aquaculture. 2018. V. 8. No. 18. P. 137–144. doi: 10.5376/ija.2018.08.0018

24. Diep D.X., Huong H.K., Tu C.C., Nam H.K. The effects of different stocking densities and feed types on frogs' growth and survival rates (*Rana tigerina* Dubois, 1981) reared in composite tanks // Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgah. 2022. V. 74. P. 1–9. doi: 10.46989/001c.36240

25. Банников А.Г., Даревский И.С., Ищенко В.Г., Рустамов А. К., Щербак Н.Н. Определитель земноводных и пресмыкающихся фауны СССР. М.: Просвещение, 1977. 415 с.

26. Писанец Е.М. Амфибии Украины: справочник-определитель земноводных Украины и сопредельных территорий. Киев: Зоологический музей ННПМ НАН Украины, 2007. 312 с.

27. Alford R.A., Harris R.N. Effects of larval growth history on Anuran metamorphosis // Am. Nat. 1988. V. 131. No. 1. P. 91–106. doi: 10.1086/284775

28. Martins F.M.S., Oom M. do M., Rebelo R., Rosa G.M. Differential effects of dietary protein on early life-history and morphological traits in natterjack toad (*Epidalea calamita*) tadpoles reared in captivity // Zoo Biol. 2013. V. 32. No. 4. P. 457–462. doi: 10.1002/zoo.21067

29. Beck C.W., Congdon J.D. Effects of age and size at metamorphosis on performance and metabolic rates of Southern Toad, *Bufo terrestris*, metamorphs // Funct. Ecol. 2001. V. 14. P. 32–38. doi: 10.1046/j.1365-2435.2000.00386.x

30. Thompson C.M., Popescu V.D. Complex hydroperiod induced carryover responses for survival, growth, and endurance of a pond-breeding amphibian // Oecologia. 2021. V. 195. No. 4. P. 1071–1081. doi: 10.1007/s00442-021-04881-3

31. Fitzpatrick M.J., Porter W.P., Pauli J.N., Kearney M.R., Notaro M., Zuckerberg B. Future winters present a complex energetic landscape of decreased costs and reduced risk for a freeze-tolerant amphibian, the Wood Frog (*Lithobates sylvaticus*) // Glob. Chang. Biol. 2020. V. 26. No. 11. P. 6350–6362. doi: 10.1111/gcb.15321

32. Berven K.A., Gill D.E. Interpreting geographic variation in life-history traits // Am. Zool. 1983. V. 23. No. 1. P. 85–97. doi: 10.1093/icb/23.1.85

33. Smith D.C. Adult recruitment in chorus frogs: effects of size and date at metamorphosis // Ecology. 1987. V. 68. No. 2. P. 344–350. doi: 10.2307/1939265

34. Semlitsch R.D., Scott D.E., Pechmann J.H.K. Time and size at metamorphosis related to adult fitness in *Ambystoma talpoideum* // Ecology. 1988. V. 69. No. 1. P. 184–192. doi: 10.2307/1943173

35. Berven K.A. Factors affecting population fluctuations in larval and adult stages of the wood frog (*Rana sylvatica*) // Ecology. 1990. V. 71. No. 4. P. 1599–1608. doi: 10.2307/1938295

36. Худяков О.И., Решоткин О.В. Эволюция почв в связи с современным потеплением климата // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 38–43. doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-038-043

37. Davis S.J., Caldeira K., Matthews H.D. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure // Science. 2010. V. 329. No. 5997. P. 1330–1333. doi: 10.1126/science.1188566

References

1. Shvarts S.S., Pyastolova O.A., Dobrinskaya L.A., Runkova G.G. Group effects in aquatic animal populations and chemical ecology. Moskva: Nauka, 1976. 152 p. (in Russian).

2. Lyapkov S.M., Severtsov A.S. The effect of the initial abundance of generation on the abundance of individuals that completed metamorphoses, their size and timing of emergence of common (*Rana temporaria*) and moor (*R. arvalis*) frogs // Zoologicheskii Zhurnal. 1994. V. 73. No. 1. P. 97–112 (in Russian).

3. Shvarts S.S., Pyastolova O.A. Regulators of the growth and development of invertebrate larvae. I. Diversity of action // Ekologia. 1970. No. 1. P. 77–82 (in Russian).

4. Rose S., Rose F. Secretion by tadpoles of substances retarding their growth // Mechanisms in Biological Competition. Moskva: Mir, 1964. P. 263–276 (in Russian).

5. Nemyko E.A., Kidov A.A., Vyatkin Ya.A. Growth, development and survivability of the Caucasian triton larvae, *Lissotriton lantzi* with different plant density in the zookultur // University proceedings. Volga region. Natural sciences. 2019. No. 1 (25). P. 113–125 (in Russian). doi: 10.21685/2307-9150-2019-1-12

6. Hartel T. An experimental study on density effects on tadpole growth, mortality and metamorphosis in yellow-bellied toad *Bombina variegata* // Biota. 2007. V. 8. No. 1-2. P. 27–34.

7. Munguia-Fragozo P.V., Alatorre-Jacome O., Aguirre-Becerra H., García-Trejo J.F., Soto-Zarazúa G.M., Rico-García E. Growth and metabolic effects of stocking density in bullfrog tadpoles (*Rana catesbeiana*) under greenhouse conditions // Int. J. Agric. Biol. 2015. V. 17. No. 4. P. 711–718. doi: 10.17957/IJAB/14.0002

8. Newman R.A. Ecological constraints on amphibian metamorphosis: Interactions of temperature and larval density with responses to changing food level // Oecologia. 2022. V. 115. No. 1-2. P. 9–16. doi: 10.1007/s004420050485

9. Kidov A.A., Ivolga R.A., Kondratova T.E., Sokolova A.D. Impact of initial density on larval development of the green toad (*Bufo viridis*, Amphibia, Anura, Bufonidae) in laboratory conditions // Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2022. V. 8. No. 3. P. 68–76 (in Russian).

10. Kidov A.A., Kidova E.A., Drozdova L.S., Vyatkin Ya.A., Ivolga R.A., Kondratova T.E., Afrin K.A., Ivanov A.A. A review of zooculture methods for studying rare and endangered amphibians from Russia and adjacent countries: The Timiryazev Academy experience // Trudy of the Institute of Zoology RK. 2021. V. 1. No. 1. P. 89–104 (in Russian). doi: 10.54944/oc260ot24

11. Beebe T., Cabido C., Eggert C., Gomez-Mestre I., Iraola A., Garin-Barrio I., Griffiths R.A., Miaud C., Oromi N.,

Sanuy D., Sinsch U., Tejedo M. 40 years of natterjack toad conservation in Europe // *FrogLog*. 2012. V. 101. P. 40–44.

12. Rannap R. Boreal Baltic coastal meadow management for *Bufo calamita* // Coastal meadow management – Best Practice Guidelines. The Experience of LIFE-Nature Project “Boreal Coastal Meadow Preservation in Estonia” / Eds. R. Rannap, L. Briggs, K. Lotman, I. Lepik, V. Rannap. Tallinn: Ministry of the Environment of the Republic of Estonia, 2004. P. 26–33.

13. Pikulik M.M. Amphibians of Belarus. Minsk: Nauka i tekhnika, 1985. 153 p. (in Russian).

14. Kuzmin S.L. Amphibians of the former USSR. Moskva: KMK Scientific Press Ltd., 2012. 370 p. (in Russian).

15. Kuzmin S.L. The natterjack toad, *Epidalea calamita* (Laurenti, 1768) // Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii, tom Zhivotnye. Moskva: FGBU “VNII Ekologiya”, 2021. P. 423–424 (in Russian).

16. Uteshev V.K., Gakhova E.N., Kramarova L.I., Kaurova S.A., Kidova E.A., Kidov A.A., Browne R.K. Russian collaborative development of reproduction technologies for the sustainable management of amphibian biodiversity // *Asian Herpetological Research*. 2023. V. 14. No. 1. P. 103–115. doi: 10.16373/j.cnki.ahr.22004

17. Kidov A.A., Kondratova T.E., Ivovga R.A., Kidova E.A. Reproductive characteristics of the natterjack toad (*Epidalea calamita*, Amphibia, Bufonidae) in laboratory conditions // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2023. V. 50. No. 7. P. 1567–1572. doi: 10.1134/S1062359023070129

18. Tejedo M., Reques R. Effects of egg size and density on metamorphic traits in tadpoles of the Natterjack toad (*Bufo calamita*) // *J. Herpet.* 1992. V. 26. No. 2. P. 146–152. doi: 10.2307/1564855

19. Kidov A.A., Matushkina K.A., Uteshev V.K., Timoshina A.L., Kovrina E.G. The first captive breeding of the Eichwald’s toad (*Bufo eichwaldi*) // *Russian Journal of Herpetology*. 2014. V. 21. No. 1. P. 40–46. doi: 10.30906/1026-2296-2014-21-1-40-46

20. Kidov A.A., Ivovga R.A., Kondratova T.E., Kidova E.A. Features of reproduction and early development in the Batura toad (*Bufo baturae*, Amphibia, Bufonidae), the most high-montaine amphibian in the former Soviet Union, based on the results of a laboratory study // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2022. V. 49. No. 9. P. 1387–1397. doi: 10.1134/S106235902209014X

21. Gosner K.L. A simplified table for staging Anuran embryos and larvae with notes on identification // *Herpetologica*. 1960. V. 16. No. 3. P. 183–190.

22. Martínez I.P., Álvarez R., Herráez M.P. Growth and metamorphosis of *Rana perezi* larvae in culture: effects of larval density // *Aquaculture*. 1996. V. 142. No. 3–4. P. 163–170. doi: 10.1016/0044-8486(96)01257-4

23. Godome T., Tossavi C.E., Djissou A.S.M., Zounon Y., Ouattara I.N., Fiogbe E.D. Effect of stocking density on the survival and growth of *Hoplobatrachus occipitalis* (Gunther, 1858) (Amphibia: Dicroglossidae) of tadpoles reared in ponds from Benin // *International Journal of Aquaculture*. 2018. V. 8. No. 18. P. 137–144. doi: 10.5376/ija.2018.08.0018

24. Diep D.X., Huong H.K., Tu C.C., Nam H.K. The effects of different stocking densities and feed types on frogs’ growth and survival rates (*Rana tigerina* Dubois, 1981) reared in composite tanks // *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgheh*. 2022. V. 74. P. 1–9. doi: 10.46989/001c.36240

25. Bannikov A.G., Darevsky I.S., Ishchenko V.G., Rustamov A.K., Szczerbak N.N. A Guide of amphibians and reptiles of the USSR fauna. Moskva: Prosveshchenie, 1977. 415 p. (in Russian).

26. Pisanets E.M. Amphibians of the Ukraine: guide-identifier amphibians of Ukraine and adjacent territories. Kiev: Zoologicheskii muzey NNPM NAN Ukrainy, 2007. 312 p. (in Russian).

27. Alford R.A., Harris R.N. Effects of larval growth history on Anuran metamorphosis // *Am. Nat.* 1988. V. 131. No. 1. P. 91–106. doi: 10.1086/284775

28. Martins F.M.S., Oom M. do M., Rebelo R., Rosa G.M. Differential effects of dietary protein on early life-history and morphological traits in natterjack toad (*Epidalea calamita*) tadpoles reared in captivity // *Zoo Biol.* 2013. V. 32. No. 4. P. 457–462. doi: 10.1002/zoo.21067

29. Beck C.W., Congdon J.D. Effects of age and size at metamorphosis on performance and metabolic rates of Southern Toad, *Bufo terrestris*, metamorphs // *Funct. Ecol.* 2001. V. 14. P. 32–38. doi: 10.1046/j.1365-2435.2000.00386.x

30. Thompson C.M., Popescu V.D. Complex hydroperiod induced carryover responses for survival, growth, and endurance of a pond-breeding amphibian // *Oecologia*. 2021. V. 195. No. 4. P. 1071–1081. doi: 10.1007/s00442-021-04881-3

31. Fitzpatrick M.J., Porter W.P., Pauli J.N., Kearney M.R., Notaro M., Zuckerberg B. Future winters present a complex energetic landscape of decreased costs and reduced risk for a freeze-tolerant amphibian, the wood frog (*Lithobates sylvaticus*) // *Glob. Chang. Biol.* 2020. V. 26. No. 11. P. 6350–6362. doi: 10.1111/gcb.15321

32. Berven K.A., Gill D.E. Interpreting geographic variation in life-history traits // *Am. Zool.* 1983. V. 23. No. 1. P. 85–97. doi: 10.1093/icb/23.1.85

33. Smith D.C. Adult recruitment in chorus frogs: Effects of size and date at metamorphosis // *Ecology*. 1987. V. 68. No. 2. P. 344–350. doi: 10.2307/1939265

34. Semlitsch R.D., Scott D.E., Pechmann J.H.K. Time and size at metamorphosis related to adult fitness in *Ambystoma talpoideum* // *Ecology*. 1988. V. 69. No. 1. P. 184–192. doi: 10.2307/1943173

35. Berven K.A. Factors affecting population fluctuations in larval and adult stages of the Wood Frog (*Rana sylvatica*) // *Ecology*. 1990. V. 71. No. 4. P. 1599–1608. doi: 10.2307/1938295

36. Khudyakov O.I., Reshotkin O.V. Soil evolution in relation to modern climate warming // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 2. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-038-043

37. Davis S.J., Caldeira K., Matthews H.D. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure // *Science*. 2010. V. 329. No. 5997. P. 1330–1333. doi: 10.1126/science.1188566

Климатические изменения годового стока рек Северного Приохотоморья

© 2024. В. Е. Глотов, д. г.-м. н., г. н. с.,
М. В. Ушаков, к. геогр. н., с. н. с.,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный
комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило
Дальневосточного отделения РАН,
685000, Россия, г. Магадан, ул. Портовая, д. 16,
e-mail: mvilorich@narod.ru

Цель данной работы – оценить происходящие климатические изменения годового стока рек Северного Приохотоморья. Ранее был проведён анализ пространственно-временных колебаний годового стока рек Магаданской области по рядам стока, которые заканчивались 2004 г., и климатических изменений речного стока не было выявлено. В настоящей же работе анализируемые ряды заканчиваются данными за 2019 г., что позволило сделать уже другие выводы. В работе использованы ряды наблюдения за речным стоком на восьми гидрологических постах. Методом гидрологической аналогии эти ряды были приведены к многолетнему периоду путём восстановления погодичных значений. Таким образом, анализу были подвержены ряды годового стока за 1958–2019 гг. Методом исследования явился анализ временных рядов стока на наличие однородности по среднему (критерий Стьюдента), а также спектральный анализ. Сравнение среднеемноголетних значений слоёв стока за два периода (1958–2000 гг. и 2001–2019 гг.) показало, что «норма» увеличилась на 5–37%. Надо заметить, что согласно критерию Стьюдента с уровнем значимости 5% эти изменения не случайны. О наличии тренда в многолетних колебаниях водности свидетельствует и временной ход динамической средней годового стока. Анализ исходных рядов стока позволил сделать вывод, что увеличение годового стока вызвано климатическими изменениями, главным образом, ростом количества осадков. Не исключено, что увеличение стока происходит и за счёт оттаивания льда в толще многолетнемерзлых пород. Обратим внимание на то, что при потеплении климата увеличиваются потери влаги на эвапотранспирацию, прежде всего за счёт прироста древесно-кустарниковой растительности. Причём на больших водосборах этот эффект более заметен. В многолетних колебаниях годового стока выявлена 6-летняя цикличность. Эти колебания, скорее всего, представляют собой нестационарный сложный Марковский процесс. Результаты настоящей работы будут полезны при проведении гидрологических расчётов, составлении долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов стока, изучении экосистем река – море.

Ключевые слова: климатические изменения, криолитозона, речной сток, эвапотранспирация, временные ряды, тренд.

Climatic changes in annual river runoff of the Northern Okhotsk Sea region

© 2024. V. E. Glotov ORCID: 0000-0002-1577-0273
M. V. Ushakov ORCID: 0000-0003-1731-7541
North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N. A. Shilo, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences,
16, Portovaya St., Magadan, Russia, 685000,
e-mail: mvilorich@narod.ru

The aim of this study was to assess the climatic changes in the annual river runoff of the Northern Okhotsk Sea region within the Magadan region. In the present work the analyzed series end with data for 2019. Observation series of river runoff at eight hydrological stations were used in this work. By the method of hydrological analogy, these series were brought to a multiyear period by restoring year-on-year values. Thus, the series of annual runoff for 1958–2019 were analyzed. The research method was the analysis of runoff time series for the presence of homogeneity in the mean (Student's criterion), as well as spectral analysis. Comparison of mean long-term values of runoff layers for two periods (1958–2000 and 2001–2019) showed that the “norm” increased by 5–37%. It should be noted that these changes are not random according to the Student's criterion with significance level of 5%. The presence of a trend in long-term water availability fluctuations is also evidenced by the time course of the dynamic mean annual runoff. Analysis of the runoff

series, mean annual air temperature and total annual precipitation made it possible to conclude that annual runoff increase is caused by climatic changes, mainly by an increase in precipitation. It is possible that runoff increase is also due to the thawing of ice in the permafrost strata. But you should pay attention to the fact that with climate warming, moisture losses for evapotranspiration increase, primarily due to the growth of trees and shrubs. Moreover, this effect is more noticeable in large catchments. A 6-year cyclicity was revealed in the long-term fluctuations of annual runoff. These fluctuations are most likely a non-stationary complex Markov process. The results of this work will be useful for hydrological calculations, long-term and ultra-long-term runoff forecasts, and studying the river – sea ecosystems. Further hydrological studies should be carried out with the obligatory study of evapotranspiration in various landscape conditions.

Keywords: climatic changes, cryolithozone, river runoff, evapotranspiration, time series, trend.

Под Северным Приохотоморьем понимается территория бассейнов рек Охотского моря в пределах Магаданской области от устья р. Тауй с запада до устья р. Гижиги на востоке. Это наиболее экономически освоенная часть области. Здесь расположен широко известный портовый город Магадан, наиболее крупные посёлки городского типа: Армань, Ола, Северо-Эвенск. На реках Тауй, Яна, Ола, Яма функционируют рыбоперерабатывающие и рыбоберерабатывающие заводы, транспортные, сельскохозяйственные и другие предприятия. Перспективы дальнейшего развития области связаны с отработкой месторождений угля, меди, золота и серебра. Названные населённые и промышленно-транспортные пункты и перспективные для открытия новых месторождений районы находятся в бассейнах рек, впадающих в Охотское море. Очень важно развитие биологических водных ресурсов. Как известно, реки исследуемого района, а также прилегающая часть Охотского моря изобилуют морскими, пресноводными рыбами, водорослями, морскими беспозвоночными и млекопитающими [1], все эти ресурсы чувствительны к изменениям режима речного стока.

По изложенным причинам в научном и практическом отношении важно знать особенности изменений режимов стока рек, связанные с происходящим потеплением климата. Необходимость таких исследований обоснована в более изученных регионах России [2].

Изучению годового стока рассматриваемой территории посвящён ряд исследований [3, 4]. В работе [3] впервые было дано подробное описание гидрологического режима рек Северо-Востока СССР. В исследовании [4] был проведён анализ пространственно-временных колебаний годового стока, предложены формулы по определению среднегодовых расходов воды различной обеспеченности на неизученных реках Магаданской области. В упомянутой работе обрабатывались ряды стока по 2004 г., и климатических изменений не было выявлено. В настоящей же работе ряды заканчиваются данными за 2019 г. и,

как будет показано ниже, за последние полторы декады произошли заметные изменения в многолетних колебаниях рассматриваемой характеристики, вызванные потеплением климата. Происходящие на планете процессы изменения климата отражаются и на гидрологическом режиме [5–9].

В последние годы проявляется интерес к природным водам Приохотоморья как экспортному товару [10].

Цель данной работы – оценить происходящие климатические изменения годового стока рек Северного Приохотоморья.

Объекты и методы исследования

Изучаемая территория занята преимущественно горными хребтами и массивами высотой до 1000–1500 м, редко выше 1800 м. Низины расположены только в бассейнах нижних течений наиболее крупных рек: Тауй, Яна, Армань, Ола, Яма, Гижига. Соответственно преобладающим развитием пользуются северо-таёжные горные редколесья. В долинах рек произрастают настоящие леса лиственницы с примесью тополей, чозении и берёзы [1].

Геологическое строение исследуемой части Магаданской области определяется её расположением, преимущественно, на площади развития Кони-Тайгоносского террейна – фрагменте позднепалеозойско-раннемезозойской островной дуги. Слагающие его породы представлены вулканотерригенными песчаниками, алевролитами, сланцами, слои которых прорваны дайками андезитов, базальтов. На значительных площадях террейн перекрыт вулканитами Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса. Велика рельефообразующая роль глубинных разломов, к которым приурочены межгорные впадины и прибрежно-морские низины [11].

Среднегодовые температуры воздуха лежат в пределах $-3,5-9,5$ °C [12]. Для этой зоны свойственно избыточное увлажнение, холодное лето, снежная зима [13].

Таблица 1 / Table 1

Среднегодовое значение слоя годового стока рек Северного Приохотоморья (мм) до 2000 г. и после / Average long-term values of the annual runoff layer of the rivers of the Northern Okhotsk Sea (mm) up to 2000 and after

Река – пункт River – point	Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	Слой стока, мм Runoff layer, mm		Прирост слоя стока, мм Growth of runoff layer, mm
		1958–2000	2001–2019	
Тауй – Талон / Taui – Talon	25100	437	530	93
Уптар – Уптар / Uptar – Uptar	285	496	642	146
Хасын – в 80 км от устья Khasyn – 80 km from the mouth	682	429	504	75
Каменушка – в 8 км от устья Kamenushka – 8 km from the mouth	40,3	568	726	158
Магаданка – Магадан Magadanka – Magadan	48,5	692	893	201
Дукча – устье / Dukcha – mouth	330	516	649	133
Дукча – Снежная Долина Dukcha – Snejnaya Dolina	119	687	943	256
Гижига – в 20 км от устья Gizhiga – 20 km from the mouth	11700	409	430	21*
Динамическое среднее Dynamic Average	–	529	665	136

Примечания: * – статистически незначимое изменение «нормы»; прочерк означает, что площадь водосбора для характеристики не применима.

Notes: * – statistically insignificant change in the “norm”; a dash means that the catchment area for the characteristic is not applicable.

Распространение многолетнемерзлых пород примерно до 60° с. ш. прерывистое, а севернее – слабо прерывистое [14, 15].

В тёплую часть года (май – октябрь) протекает основная масса воды (94–98%) [3]. Весеннее половодье проходит в мае – июне, дождевые паводки наблюдаются в июне – сентябре, реже в октябре.

В гидрологическом отношении Северное Приохотоморье слабо изучено [16]. На рассматриваемой территории имеются наблюдения за речным стоком на восьми гидрологических постах (табл. 1). Данные о стоке взяты из справочника [17] и Гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра. Ряды годового стока были выражены в слоях стока. Методом гидрологической аналогии эти ряды были приведены к многолетнему периоду путём восстановления погодичных значений.

Методом исследования явился анализ временных рядов стока на наличие однородности по среднему (критерий Стьюдента), а также спектральный анализ. Спектральная функция $S(T)$ рассчитывалась с использованием весовой функции Хэмминга по формуле [18]

$$S(T) = 1/2\pi + \sum_{\tau=1}^m [(0,54 + 0,46 \cos(\pi\tau / m)) \cdot r(\tau) \cos(2\pi\tau / T)] / \pi \quad (1)$$

где τ – сдвиг по времени с дискретностью 1 год; m – максимальный сдвиг по τ ($m=n/2$ лет); $r(\tau)$ – ординаты автокорреляционной функции; T – период ($T=1, 2, \dots, m$ лет).

Многолетние данные о среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме осадков по метеостанции Магадан были взяты на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных [19] (табл. 2, рис. 1).

Результаты и обсуждение

Сравнивая среднегодовое значение слоёв стока за два периода (1958–2000 гг. и 2001–2019 гг.), можно заметить, что «норма» увеличилась на 5–37% (см. табл. 1). Согласно критерию Стьюдента с уровнем значимости 5% эти изменения не случайны, за исключением стока на р. Гижиге, где «норма» увеличилась незначительно. О наличии тренда в многолетних колебаниях водности свидетельствует и временной ход динамической средней годового стока (рис. 2а). Погодичные значения динамического среднего слоя годового стока рассчитывались по формуле

$$H_i = \frac{\sum_{j=1}^m h_{ij}}{m} \quad (2)$$

где h_j – слой годового стока в пункте j в год i ; m – количество пунктов.

Сопоставляя кривые на рисунках 1 и 2а, а также данные таблиц 1 и 2, можно сделать вывод, что увеличение годового стока вызвано климатическими изменениями, главным образом ростом количества атмосферных осадков. Это подтверждается и удовлетворительной связью относительного прироста среднемноголетнего слоя годового стока с относительным приростом годовой суммы осадков (рис. 3).

$$100\% \cdot \Delta h / h_0 = 1,44 \lg(100\% \cdot \Delta x / x_0) + 3,3 ; r=0,72, (3)$$

где h – прирост «нормы» слоя стока (мм); h_0 – «норма» слоя стока за 1958–2000 гг. (мм); x – прирост «нормы» годовой суммы атмосферных осадков (мм); x_0 – «норма» суммы осадков за 1966–2000 гг. (мм).

Не исключено, что увеличение стока происходит и за счёт оттаивания льда в толще многолетнемёрзлых пород, ранее нами названного гидрокриогенным ресурсом [20]. Последнее заключение основано не только на данных гидрометеостанций Северо-Востока России, но и на данных об оттаивании криолитозоны в высокогорных районах Кавказа [21].

Интересна редукция относительного прироста слоя годового стока по площади водосбора (рис. 4).

Эту особенность мы можем объяснить следующим. В условиях потепления климата идёт более интенсивное развитие растительного покрова, а, значит, наблюдается увеличение потерь речного стока на эвапотранспирацию. Причём по мере увеличения размеров бассейна уменьшается средняя высота водосбора, а, следовательно, климатический прирост зелёной массы становится больше, нежели

Таблица 2 / Table 2

Среднемноголетние значения среднегодовой температуры воздуха, суммы осадков за год до 2000 г. и после / Long-term average values of mean annual air temperature and total annual precipitation up to 2000 and after

Период осреднения, годы Averaging period, years	Среднегодовая температура воздуха на метеостанции Магадан, °C Mean annual air temperature at Magadan weather station, °C	Годовая сумма атмосферных осадков на метеостанции Магадан, мм Total annual precipitation at Magadan weather station, mm	Годовая сумма атмосферных осадков на метеостанции Талон, мм Total annual precipitation at Talon weather station, mm	Годовая сумма атмосферных осадков на метеостанции Шелихово, мм Total annual precipitation at Shelikhovo weather station, mm
1958–2000	-3,2	534	720	449
2001–2019	-2,2	626	771*	476*

Примечание: * – статистически незначимый прирост «нормы». / Note: * – statistically insignificant increase in the “norm”.

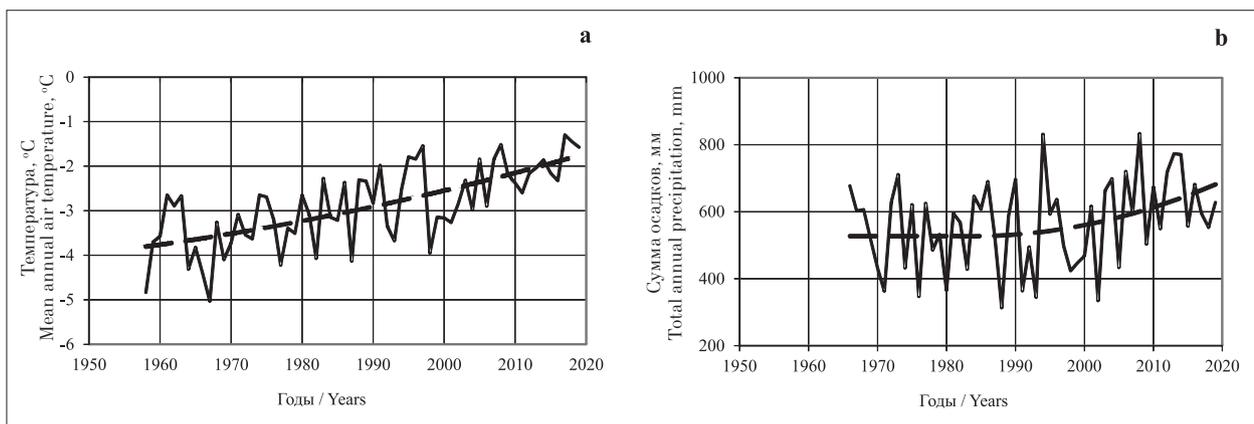


Рис. 1. Временной ход среднегодовой температуры воздуха (а) и суммы осадков за год (б) в г. Магадане. Пунктиром проведены линии тренда / Fig. 1. The time course of the mean annual air temperature (a) and total annual precipitation (b) in Magadan. The trend lines are dotted

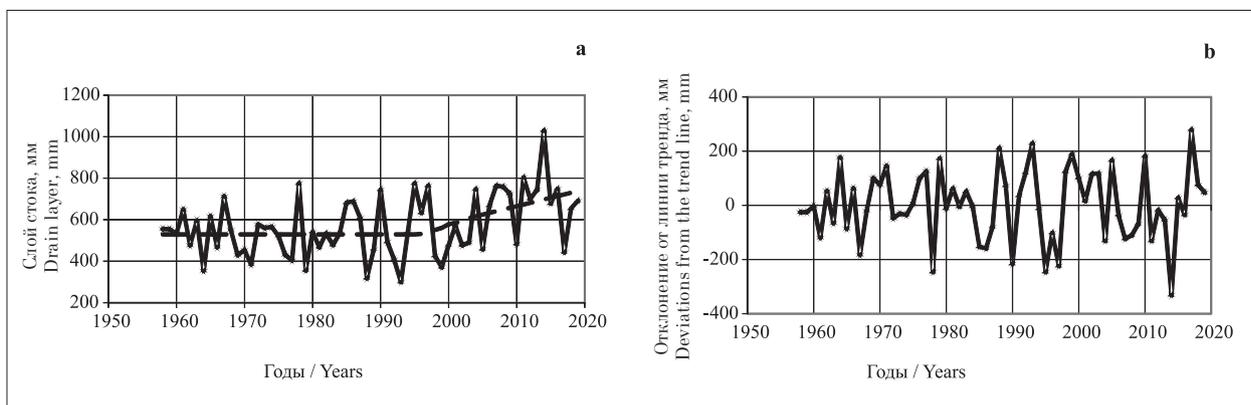


Рис. 2. Многолетние колебания динамического среднего слоя стока за год рек Северного Приохотоморья (а) и его отклонений от линии тренда (б). Пунктиром проведена линия тренда
Fig. 2. Long-term fluctuations of the dynamic mean annual runoff layer of the rivers of the Northern Okhotsk Sea region (а) and its deviations from the trend line (б). The trend line is dotted

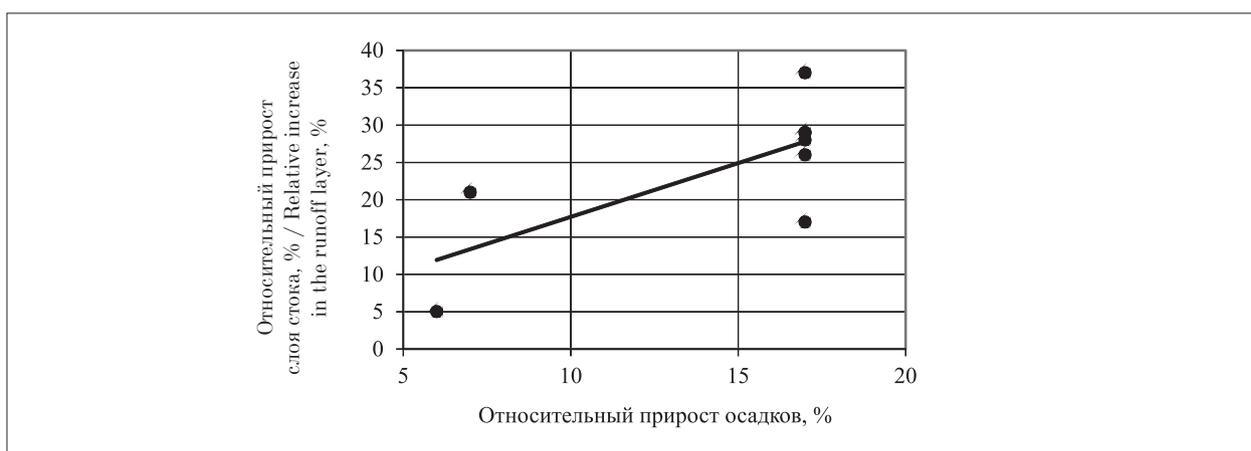


Рис. 3. Связь относительного прироста слоя годового стока рек Северного Приохотоморья с относительным приростом годовой суммы осадков
Fig. 3. Correlation between the relative increase in the annual runoff layer of the rivers of the Northern Okhotsk Sea region and the relative increase in the total annual precipitation

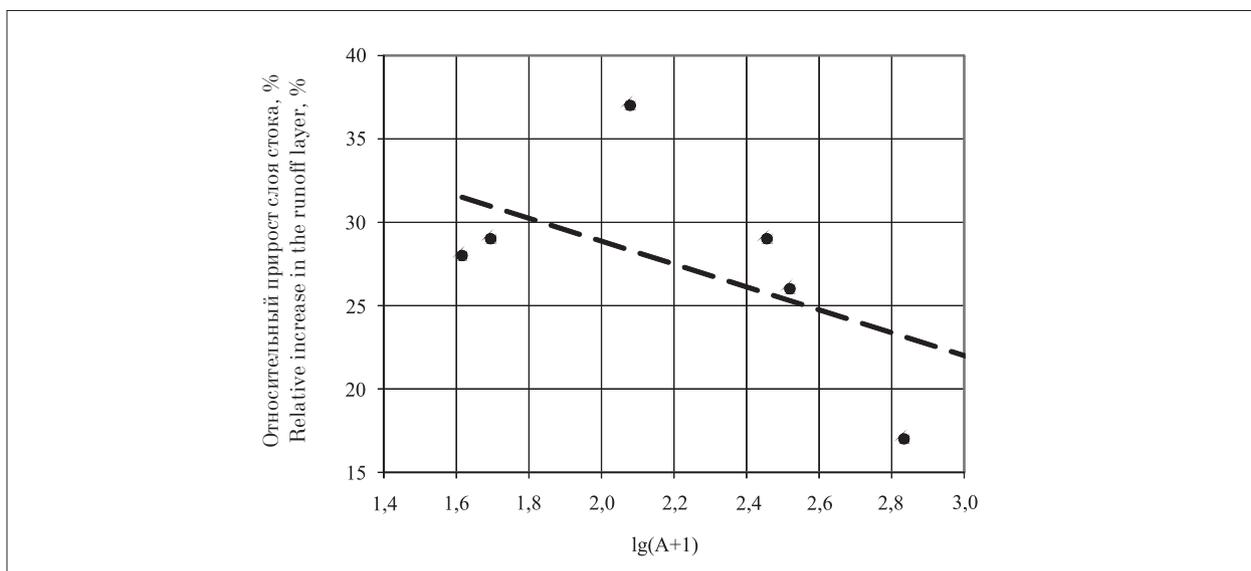


Рис. 4. Связь относительного прироста слоя годового стока рек Северного Приохотоморья с площадью водосбора, A (km^2)
Fig. 4. Correlation between the relative increase in the annual runoff layer of the rivers of the Northern Okhotsk Sea region and the catchment area, A (km^2)

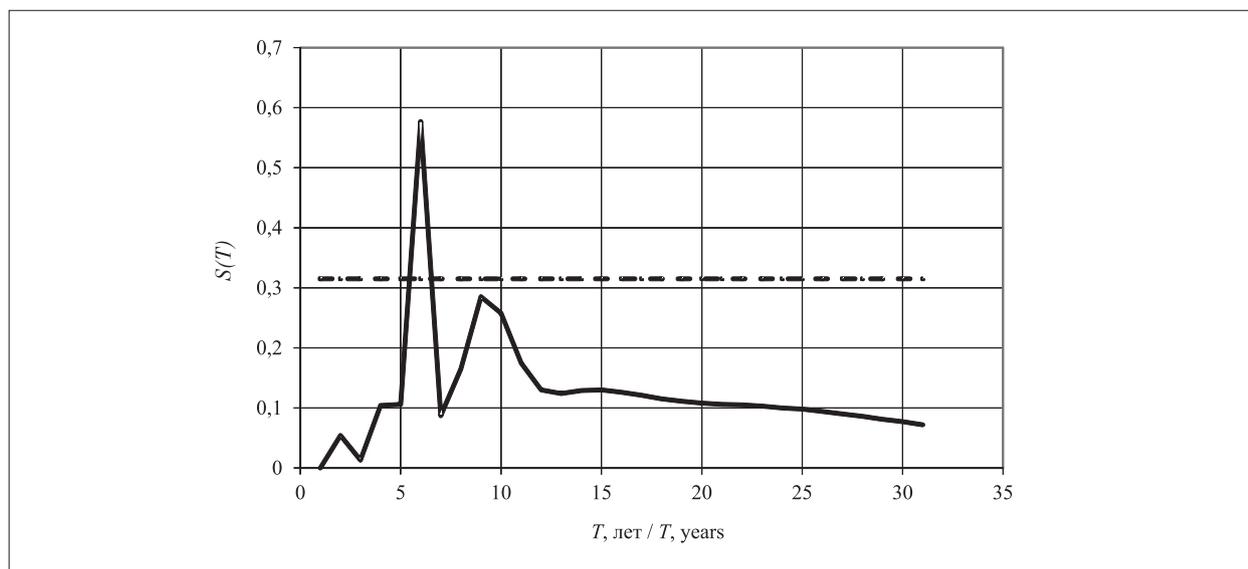


Рис. 5. Спектрограмма отклонений динамического среднего от линии тренда.

Пунктиром проведён 5%-ный доверительный уровень

Fig. 5. Spectrogram of deviations of the dynamic mean from the trend line.
The dotted line shows the 5% confidence level

в высотных поясах. Таким образом, приращение стока за счёт увеличения количества осадков на больших водосборах менее заметно.

Данное заключение носит характер предположения, так как роль эвапотранспирации в формировании стока рек Северо-Востока России слабо изучена. Некоторые сведения можно получить из материалов Колымской водно-балансовой станции (КВБС), расположенной в верховьях р. Колымы. Так, в бассейне руч. Контактный в июне – августе 1978–1984 гг. экспериментально выявили, что потери влаги на испарение на поверхности мелкообломочной каменной осыпи без растительности, в среднем, составляли 28% от суммы осадков и 38,7% на поверхности, покрытой кустарничком [22]. Таким образом, растительность увеличивает потери влаги на 10–11% от суммы осадков в летнее время. В условиях, близких к южным районам Северного Приохотоморья – в горах Чугач (штат Аляска США) в поясе редколесья эвапотранспирация на абсолютных высотах 100–350 м достигает 55% от суммы выпадающих осадков [23]. Надо заметить, что гидрологическая роль этого процесса недооценена, хотя потери влаги на общее испарение могут играть ведущую роль, например, в формировании различий режима стока горных рек не только в пределах развития многолетнемерзлых пород, но и в таких тёплых странах как Армения и Украина [24].

Временной ход отклонений от линии тренда показан на рисунке 2b. Судя по спек-

трограмме, многолетние колебания этих отклонений имеют 6-летнюю цикличность (рис. 5). Ранее такая же цикличность была выявлена в колебаниях годового стока Колымы, протекающей по другую сторону Главного водораздела Земли [4].

Допускаем, что в районах распространения слабопрерывистой мерзлотной зоны потепление климата сказывается на увеличении глубины сезонного протаивания сильнее, чем в районах прерывистой мерзлоты. В свою очередь, это благоприятствует активизации развития растительного покрова по эффективности более значительной, чем в районах с прерывистым распространением многолетнемерзлых пород.

Заключение

Современные изменения климата привели к ощутимому росту годового стока рек Северного Приохотоморья – на 5–37%. Прирост стока обусловлен главным образом увеличением количества атмосферных осадков. Но следует обратить внимание на то, что при потеплении климата увеличиваются потери влаги на эвапотранспирацию, прежде всего за счёт прироста древесно-кустарниковой растительности. Причём на больших водосборах этот эффект более заметен. Возможна компенсация потерь за счёт оттаивания подземных льдов, конденсации влаги в сезонноталом слое. Следовательно, связь стока с климатическими изменениями многогранна. Это отражается

в многолетних колебаниях годового стока, в которых проявлена 6-летняя цикличность. Эти колебания, скорее всего, представляют собой нестационарный сложный Марковский процесс.

Результаты настоящей работы будут полезны при проведении гидрологических расчётов, составлении долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов стока, изучении экосистем река – море.

Дальнейшие гидрологические исследования необходимо проводить с обязательным изучением эвапотранспирации, дополнительных источников воды в различных ландшафтных обстановках.

Литература

1. Ландшафты, климат и природные ресурсы Тауйской губы Охотского моря / Отв. ред. И. А. Черешнев. Владивосток: Дальнаука, 2006. 525 с.
2. Косолапов А.Е., Косолапова Н.А., Матвеева Л.Г., Чернова О.А. Рациональность использования водных ресурсов в экономике горных территорий Северного Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 1 (35). С. 48–62.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 600 с.
4. Lobanov S.A., Ushakov M.V. The river water resources of the Magadan region and their long-term variability // Geogr. Nat. Resour. 2008. V. 29. No. 3. P. 247–250. doi: 10.1016/j.gnr.2008.09.008
5. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167 [Электронный ресурс] https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/wmo_2015.pdf (Дата обращения: 16.08.2023).
6. Gartsman B.I., Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation // Water Resour. 2017. V. 44. No. 5. P. 697–706. doi: 10.1134/S0097807817050062
7. Ушаков М.В. Климатические изменения минимального суточного стока за летне-осенний период на реках северного Приохотоморья // Пресноводные экосистемы – современные вызовы: тезисы докладов и стендовых сообщений международной конференции. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2018. P. 349–350.
8. Ushakov M.V., Ukhov N.V. Modern changes in the thermal regime of mountain rivers in the permafrost zone (a case study for the Upper Kolyma) // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 45. No. 12. P. 858–863. doi: 10.3103/S1068373920120067
9. Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 64–69. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-064-069
10. Глотов В.Е. Природные воды Северо-Востока как перспективный товар для международного рынка // Экология и развитие общества. 2020. № 2–3 (3). С. 65–73.
11. Бялобжеский С.Г., Горячев Н.А., Шпикерман В.Ф. Олойско-Чукотский орогенный пояс // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 144–152.
12. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 33. Магаданская область, Чукотский автономный округ Магаданской области. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 566 с.
13. Север Дальнего Востока / Под ред. Н.А. Шило. М.: Наука, 1970. 487 с.
14. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.
15. Глотов В.Е., Глотова Л.П. Гидрогеология северной береговой зоны Охотского моря // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–42.
16. Ушаков М.В. О сокращении стационарной гидрологической сети на Северо-Востоке России // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвящённой 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2019. С. 172–173.
17. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 17. Бассейны Колымы и рек Магаданской области. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 429 с.
18. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 239 с.
19. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс] <http://meteo.ru/data/> (Дата обращения: 12.12.2020).
20. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатические изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 6. С. 33–44.
21. Лурье П.М., Панов В.Д., Панова С.В. Криосфера Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11. № 40. С. 182–190. doi: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-182-190
22. Бояринцев Є.Л., Гопченко Є.Д., Сербов М.Г., Завалій Н.В. Експериментальні дослідження випаровування та конденсації в гірських регіонах багаторічномерзлих ґрунтів // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2010. № 10. С. 162–168.
23. Dearborn L.L., Barnwel W.W. Hydrology for land-use planning: the Hillside area, Anchorage, Alaska. Open-File Report 75–105. Anchorage, Alaska, 1975. 46 p. doi: 10.3133/ofr75105
24. Маргарян В.Г., Овчарук В.А., Гопций М.В., Боровская Г.А. Сравнительный анализ и оценка много-

летних колебаний максимального стока рек горных территорий Армении и Украины в условиях глобальных изменений климата // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 1 (43). С. 61–75. doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-61-75

References

1. Landscapes, climate and natural resources of the Tauysk bay of the sea of Okhotsk / Ed. I.A. Chereshev. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 525 p. (in Russian).
2. Kosolapov A.E., Kosolapova N.A., Matveeva L.G., Chernova O.A. Efficiency of water resource use in the economics of the North Caucasus mountain areas // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. V. 10. No. 1 (35). P. 48–62 (in Russian).
3. Resources of surface waters of the USSR. V. 19. North-East. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 600 p. (in Russian).
4. Lobanov S.A., Ushakov M.V. The river water resources of the Magadan region and their long-term variability // Geogr. Nat. Resour. 2008. V. 29. No. 3. P. 247–250. doi: 10.1016/j.gnr.2008.09.008
5. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167 [Internet resource] https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/wmo_2015.pdf (Accessed: 16.08.2023).
6. Gartsman B.I., Lupakov S.Yu. Effect of climate changes on the maximal runoff in the Amur basin: Estimation based on dynamic-stochastic simulation // Water Resour. 2017. V. 44. No. 5. P. 697–706. doi: 10.1134/S0097807817050062
7. Ushakov M.V. Climatic changes of the minimum day flow for a summer-autumn period on the rivers of the North Priokhotomorie // Freshwater Ecosystems – Key Problems: International conference. Abstracts. Irkutsk: LLC “Megaprint”, 2018. P. 348–349.
8. Ushakov M.V., Ukhov N.V. Modern changes in the thermal regime of mountain rivers in the permafrost zone (a case study for the Upper Kolyma) // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 45. No. 12. P. 858–863. doi: 10.3103/S1068373920120067
9. Danilenko A.O., Georgiadi A.G. The influence of modern climate warming on the water flow and major ion flux of the Northern Dvina // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 64–69 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-064-069
10. Glotov V.E. Natural waters of the North-East as a promising commodity for the international market // Ekologiya i razvitie obshchestva. 2020. No. 2–3 (3). P. 65–73 (in Russian).
11. Bjalobzheskij S.G., Gorjachev N.A., Shpikerman V.F. Oloj-Chukotka orogenic belt // Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East / Ed. A.I. Khanchuk. Book 1. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. P. 144–152 (in Russian).
12. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Ser. 3. V. 33. Magadan Oblast, Chukotka Autonomous Okrug of Magadan Oblast. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 566 p. (in Russian).
13. North of the Far East / Ed. N.A. Shilo. Moskva: Nauka, 1970. 487 p. (in Russian).
14. Geokryology of USSR. The East Siberia and Far East / Ed. E.D. Ershov. Moskva: Nedra, 1989. 515 p. (in Russian).
15. Glotov V.E., Glotova L.P. Hydrogeology of the northern coastal zone of the Sea of Okhotsk // Ti-hookeanskaja geologija. 2008. V. 27. No. 6. P. 31–42 (in Russian).
16. Ushakov M.V. The decline of the stationary hydrological network in the North-East of Russia // Ecological problems of the Northern Regions and ways to their solution: Abstracts of VII Russian Scientific Conference with international participation “Ecological problems of the Northern Regions and ways to their solution”, dedicated to the 30th anniversary of the Institute of North Industrial Ecology Problems and to the 75th anniversary celebration of Professor V.V. Nikonov. Apatity: Kola Science Centre of the RAS, 2019. P. 172–173 (in Russian).
17. Long-term data on the regime and resources of land surface waters. V. 1. No. 17. The basins of the Kolyma River and rivers of Magadan Oblast. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 429 p. (in Russian).
18. Shelutko V.A. Numerical methods in hydrology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 239 p. (in Russian).
19. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center [Internet resource] <http://meteo.ru/data/> (Accessed: 12.12.2020).
20. Glotov V.E., Ushakov M.V. Climatic changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka // Kriosfera Zemli. 2020. V. 24. No. 6. P. 33–44 (in Russian).
21. Lurie P.M., Panov V.D., Panova S.V. Cryosphere of the Greater Caucasus // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij. 2019. V. 11. No. 40. P. 182–190 (in Russian). doi: 10.21177/1998-4502-2019-11-2-182-190
22. Bojarincev E.L., Gopchenko E.D., Serbov N.G., Zavalij N.V. Experimental studies of evaporation and condensation in mountainous regions of the permafrost zone // Vestnik Odesskogo gosudarstvennogo jekologicheskogo universiteta. 2010. No.10. P. 162–168 (in Ukrainian).
23. Dearborn L.L., Barnwel W.W. Hydrology for land-use planning: the Hillside Area, Anchoridge, Alaska. Open-File Report 75–105. Anchoridge, Alaska, 1975. 46 p. doi: 10.3133/ofr75105
24. Margarjan V.G., Ovcharuk V.A., Goleij M.V., Borovskaja G.A. Comparative analysis and estimate of long-term fluctuations of the maximum runoff of the mountain territories of Armenia and Ukraine under of global climate change // Sustainable Development of Mountain Territories. 2020. V. 12. No. 1 (43). P. 61–75 (in Russian). doi: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-61-75

Drained peatlands rewetting as a promising trend for carbon offsets in Russia: legal and economic aspects

© 2024. Y. M. Gordeeva^{1,2} ORCID: 0000-0003-4337-6721*

Yu. V. Fursa³ ORCID: 0009-0006-4381-8859*

K. L. Shahmatov^{3,4} ORCID: 0009-0009-9285-310X*

¹Vyatka State University,

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

²Hasselt University,

42, Campus Hasselt, Martelarenlaan, Belgium, 3500,

³Center for technologies of sustainable development,

50, building 2, room 433, 29/2, Aviamotornaya St., Moscow, Russia, 111024,

⁴Tver State Technical University,

22, Afanasyi Nikitin St., Tver, Russia, 170026,

e-mail: em_gordeeva@vyatsu.ru, yelena.gordeeva@uhasselt.be

“Zero” greenhouse gas (GHG) emissions is one of the most pressing climate protection goals worldwide. The most important questions for the Russian Federation are about the significance and role of the country’s ecological systems in achieving “carbon neutrality”: creating conditions to reduce emissions and increase the GHG absorption by ecosystems, the implementation of natural climate projects to protect the climate in the country, and recognition climate outcomes of such projects at the national and international levels. This article analyzes legal and economic aspects of the emerging trend of Russian drained temperate peatlands rewetting as a new carbon offset strategy. We discuss the regulatory context and evaluate non-climate benefits. Drained peatlands rewetting holds promise for substantial GHG reduction in the country. However, further development of the methodology and alignment with relevant international standards is required for international recognition of the national carbon offset projects focused on drained peatlands rewetting.

Keywords: carbon offsetting, greenhouse gas emissions, nature-based solutions to climate change, rewetting of drained peatlands.

УДК 341:349.6

Вторичное обводнение осушенных торфяников как перспективное направление реализации климатических проектов в России: юридический и экономический аспекты

© 2024. Е. М. Гордеева^{1,2}, д. ю. н., доцент,

Ю. В. Фурса³, к. э. н., директор,

К. Л. Шахматов^{3,4}, к. т. н., директор по науке,

¹Вятский государственный университет,

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

²Университет Хасселт,

3500, Бельгия, г. Хасселт, Мартеларенлаан, Хасселт Кампус, д. 42,

³ООО «Центр технологий устойчивого развития»,

111024, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 50,

строение 2, комната 433, 29/2,

⁴Тверской государственный технический университет,

170026, Россия, г. Тверь, Набережная Афанасия Никитина, д. 22,

e-mail: em_gordeeva@vyatsu.ru, yelena.gordeeva@uhasselt.be

Достижение «климатической нейтральности» или «нулевых» выбросов парниковых газов – это одна из наиболее актуальных целей в области охраны климата во всём мире. Для Российской Федерации наиболее актуальными являются вопросы о значении и роли экологических систем страны в достижении «углеродной нейтральности»: создание условий для снижения выбросов и увеличения поглощения парниковых газов экосистемами, реализация природных климатических проектов по защите климата в стране и признание климатических результатов таких проектов на национальном и международном уровнях. Целью исследования является анализ юридического и экономического аспектов нового направления реализации природных климатических проектов по компенсации выбросов углерода в России – вторичного обводнения ранее осушенных торфяных болот. Оценивая климатические и другие экологические «выгоды» реализации такого типа климатических проектов и исследуя законодательный контекст, авторы приходят к выводу, что обводнение торфяников – это перспективное направление реализации климатических проектов в России, открывающее перспективы для существенного сокращения выбросов парниковых газов в стране. Однако потребуются дальнейшая разработка методологии и приведение её в соответствие с международными стандартами по компенсации выбросов углерода для того, чтобы обеспечить международное признание.

Ключевые слова: компенсация выбросов углерода, выбросы парниковых газов, природно-климатический проект, вторичное обводнение осушенных торфяников.

Climate change is considered to be the most significant and urgent issue of the 21st century. The main international framework for climate protection includes the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [1], the Kyoto Protocol to the UNFCCC [2], and the Paris Agreement (PA) [3]. As these instruments are being implemented into national legal systems, some authors [4–7] have noted a myriad of theoretical, regulatory, and practical challenges have surfaced that require attention at both the national and international levels. Achieving carbon neutrality (or “zero” greenhouse gas (GHG) emissions) is a pivotal issue since the adoption of the PA [8–10].

The role and significance of the country’s ecological systems in attaining carbon neutrality holds particular importance for the Russian Federation [11]. The country endorsed the PA, underscoring its commitment to safeguarding forests and other ecosystems, enhancing their absorption capacity, and emphasizing the need to consider this capacity extensively in implementing the PA mechanisms [11].

The aim of our study is to consider legal and economic aspects of a new approach to nature-based carbon offset projects in Russia, aligning with the PA. Specifically, the focus is on drained temperate peatlands rewetting.

Materials and methods of research

The study examines the potential of the country’s ecological systems to implement a new approach to carbon offsetting – specifically, the rewetting of drained temperate peatlands. Additionally, the study seeks to outline the non-climate benefits associated with such carbon offset initiatives and scrutinize the regulatory framework in the context of this emerging trend.

Our methodology adopts an empirical and interdisciplinary approach. Information was sourced from scientific articles, reports and statistical materials of international organizations and national authorities as well as materials of scientific conferences, focusing on nature-based solutions to climate change, with a particular emphasis on drained peatlands rewetting carbon offset projects. An extensive internet desk research, conducted using Yandex and Google scholar, involved targeted searches employing keywords and their combinations, such as “drained peatlands rewetting”, “carbon offset projects”, and “nature-based solutions to climate change”.

The preliminary findings of this study were presented at the 25th Saint-Petersburg International Forestry Forum, specifically during the session on the climate agenda for forest users held in September 2023 in Saint-Petersburg, Russia (<https://spiff.ru/en/#agenda>). At a later stage, discussions took place during several session on “Drained peatlands rewetting in temperate climate conditions” at the 28th Conference of Parties to the UNFCCC in Dubai, United Arab Emirates, in December 2023. The above forums provided valuable platforms for exchanging insights and refining the research direction.

Results and discussion

Within the overarching research objective of this article, it is crucial to underscore Russia’s continuous commitment to the “Convention on Wetlands” (Ramsar, Iran, 1972), a commitment upheld since 1977. The primary aim of this Convention is the “conservation and rational use of all wetlands” (Article 2). Wetlands, as defined by the convention, encompass areas of marsh, fen, peatland, or water, whether natural or artificial, with static or flowing water, whether

fresh, brackish, or salt, including marine areas with a depth not exceeding six meters at low tide (Article 1) [12].

Peatlands constitute approximately 3% of the global land area, and hold twice the amount found in all the world's forests combined, or nearly as much carbon as the atmosphere [13]. However, drained peatlands have the potential to release stored over millennia carbon into the atmosphere, primarily through management and wildfires. Scientists view the rewetting of drained peat deposits as a promising and effective carbon offset project [14, 15].

Notably, there have been discussions in Russia regarding the possibility of withdrawing from the above Convention since 2023 due to the Resolution XIV.20 adopted by the Ramsar Convention in November 2022 [16]. But the scientific community actively advocates for Russia's continued involvement in this pivotal international treaty, which addresses the conservation and sustainable use of wetlands. They emphasize that at present, there are 96 specially protected areas in Russian wetlands under Ramsar jurisdiction, for which the international Ramsar status is an additional protection. Moreover, some of the Ramsar wetlands in Russia are outside the protected areas boundaries and this international status is the only guarantee of their conservation and sustainable use [17].

The "Strategy of Socio-Economic Development of the Russian Federation with Low Greenhouse Gas Emissions until 2050" (Resolution of the Government of the Russian Federation No. 3052-r from 29.10.2021) is a cornerstone of the socio-economic development plan with low GHG emissions until 2050. This document emphasizes the paramount importance of researching the capacity of water bodies to absorb and accumulate GHGs. Special attention is paid to the advancing applicable technologies and implementing additional measures to augment GHG absorption by water bodies throughout Russia. In order to implement the objectives outlined in both the current and intensive scenarios of the Strategy, various actions are deemed essential. Among these, the strategy highlights the imperative to undertake the rewetting of previously drained peatlands, ensuring their fire safety and effectively managing their water balance [18]. This strategic approach aligns with the overarching goal of fostering sustainable development with reduced GHG emissions, emphasizing the pivotal role of wetlands in mitigating climate change impacts.

Peatlands occupy approximately 8% of Russia, and when considering shallow peatlands,

this figure expands to over 20% of the country's territory [14]. Remarkably, Russia harbors over 30% of the world's peatlands, covering an extensive area of 80 Mha. The peat reserves in Russia alone amount to 175 Gt, constituting 35% of the total global reserves.

However, the environmental challenge lies in the fact that drained peatlands globally contribute to over 6% of the total CO₂ emissions. Carbon dioxide emissions from drained peatlands, including those from fires, are more than 2 Gt a⁻¹ [19]. This accounts for approximately 25–30% of total emissions in the global agriculture and 5% in the industrial sector [20]. According to [19], GHG emissions associated with drained peatlands may account for 12–41% of GHG emissions in the 2020–2100. This emphasizes the critical role that managing peatlands, particularly addressing their drainage, plays in mitigating global carbon emissions.

In Russia, over 10 Mha of peatlands were drained until 1990: more than 5 Mha for agriculture, over 3 Mha for forestry and more than 1.5 Mha for peat extraction [14]. Presently, a considerable portion of these previously disturbed and drained peatlands remains abandoned or is utilized inefficiently, often resulting in land degradation, peat fires, heightened GHG emissions, and other detrimental outcomes. Therefore, the practice of rewetting drained abandoned peatlands is assumed to be most effective in order to prevent and/or remedy such adverse effects, but primarily to prevent peat fires, which differ from other natural fires in their duration, release of combustion products dangerous to humans and carbon loss [21]. The rewetting involves restoring natural moisture levels to approximate those found in undisturbed wetlands. A professional and ecologically informed application of the rewetting process besides reducing GHG emissions also yields various positive "benefits". These benefits encompass the reinstatement of the territory's hydrological balance, restoring unique flora and fauna habitats as well as biodiversity of wetlands, diminished risk of peat fires, and enhancements in the socio-economic status of surrounding areas, etc. [10–25]. Unfortunately, the majority of previously drained Russian peatlands are not categorized as water bodies, which complicates the legal approval of rewetting measures [21].

Nature-based solutions to climate change encompass deliberate human interventions aimed at reducing emissions and enhancing GHG absorption in ecosystems [26]. Particularly, a carbon offset project focused

on drained peatlands rewetting entails a scientifically grounded set of measures to manage the water regime. This set of actions is directed at the restoration of degraded lands, optimizing ecosystem management, and thereby contributing to the mitigation of GHG emissions while facilitating carbon storage in the form of peat.

The implementation of a carbon offset project on drained peatlands rewetting typically includes the following stages.

1. Mandatory research and surveys.

In-depth examination of information related to selected peatlands, encompassing geomorphology, geology, hydrogeology, stratigraphy, and developmental history. Conducting comprehensive field surveys to provide a thorough and reliable characterization of the current state of the peatland. Pre-selection of project sites to enhance project efficiency and alignment with stakeholder objectives, including the local communities.

2. Development of project documentation and its validation.

Formulating detailed project design document that outlines the strategies, methodologies, and expected outcomes. Subjecting the project documentation to a validation process, ensuring its alignment with established methodologies and standards.

3. Project implementation.

Execution of planned set of actions for drained peatlands rewetting based on validated project documentation.

4. Development and implementation of monitoring:

Establishment of a robust monitoring framework to systematically assess the project's progress and impact. Regular monitoring activities to track ecological and climate-related parameters.

5. Obtaining climate results and verification.

6. Registration of the project and climate results.

These stages collectively constitute a comprehensive and systematic approach to the successful implementation, validation and verification of a carbon offset project focusing on drained peatlands rewetting.

Previous scientific research demonstrated that carbon offset projects focusing on ecosystem restoration can yield substantial climate benefit [19, 27–29].

Scientists estimate that the climate impact of a carbon offset project focused on drained peatland rewetting can vary widely, ranging

2–40 t CO₂-eq. ha⁻¹ a⁻¹ [14]. This variability is influenced by diverse factors. The amalgamation of a broad spectrum of positive effects encompassing environmental, social, and economic aspects contributes to elevating the market value of carbon units generated through the implementation of such projects.

Recognizing drained peatland rewetting as a promising category of carbon offset projects, Russian scientists advocate for its inclusion in the Operational Plan of the Low Carbon Development Strategy-2050 [14]. This recommendation underscores the potential of such projects to not only mitigate GHG emissions but also to deliver a multifaceted array of benefits, reinforcing their significance within the broader framework of sustainable development.

Considering the positive impacts associated with drained peatlands rewetting and recognizing the potential for implementing such carbon offset projects in Russia, the Federal State Budgetary Institution of Global Climate and Ecology has formulated a national methodology for the execution of carbon offset projects focusing on the rewetting of drained temperate peatlands. In July 2023, the draft methodology, titled “Rewetting of Drained Temperate Peatlands”, underwent extensive public consultations, including solicitation of feedback on the official website of the national registry of carbon units (<https://carbonreg.ru/en/>). Until September 2023, the draft methodology remained accessible online for all interested stakeholders, providing an opportunity to submit comments and insights for consideration.

The formulation of a methodology for carbon offset projects focusing on drained peatlands rewetting, along with its open discussion, holds the potential to serve as a catalyst for the widespread implementation of such projects across various regions in the country. According to [21], the assessment of the program of rewetting of fire-prone peatlands in the Moscow region (2010–2013; the peatland area was 1.5 thousand ha) showed a whole reduction of carbon emissions by 33.4 kt by 2022; this reduction can reach almost 113 kt by 2050. This could have a positive impact on reducing GHG emissions, not only on a national scale but also globally. Prominent industrial entities in Russia are already actively engaged in initiating pilot carbon offset projects centered on drained peatlands rewetting in various regions, exemplified by Severstal in the Vologda region, SIBUR in the Nizhny Novgorod region, and RUSAL in the Leningrad region [14].

Conclusion

In conclusion, the rewetting of drained temperate peatlands emerges as a promising trend for carbon offset projects in Russia. The nation possesses substantial ecological potential for the successful implementation of such initiatives, supported by the development of a national methodology. Noteworthy prominent industrial entities are already actively pursuing pilot carbon offset projects in various regions of the country, signaling a tangible commitment to this environmentally impactful endeavor. The outcomes of these projects extend beyond the reduction of GHG emissions and the long-term sequestration of GHGs in peat. The outcomes also encompass the mitigation of fire hazards in regional landscapes and the restoration of the unique biodiversity inherent to wetland ecosystems.

Presently, we explore avenues to showcase Russia's potential for implementing such carbon offset projects at the international level. This outreach seeks to garner attention from international experts, scientists, and investors, highlighting the novel trend of drained temperate peatlands rewetting as a viable carbon offset strategy in Russia.

The authors of this paper emphasize the crucial need for continued efforts to ensure that the results of carbon offset projects on drained peatlands rewetting, implemented in accordance with the national methodology within the country's territories, may also satisfy international standards. This underscores the importance of ongoing collaboration, advocacy, and engagement with international entities to promote the acknowledgment of the methodology on drained temperate peatlands rewetting on a global scale. The commitment to international recognition aligns with the broader objective of contributing to worldwide efforts for climate mitigation and sustainable ecosystem management.

References

1. United Nations Convention on Climate Change (UNFCCC) [Internet resource] <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf> (Accessed: 04.07.2021).
2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change [Internet resource] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf> (Accessed: 04.07.2021).
3. Paris Agreement [Internet resource] https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (Accessed: 05.06.2021).

4. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223

5. Domrachev D.G., Kirillovykh A.A. The legal regime for limiting greenhouse gas emissions as a climate protection tool // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 191–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-191-197

6. Gordeeva E.M., Pugach V.N. The Paris Agreement and “climate neutrality”: the role of the “Agriculture, forestry and other land use” sector // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227

7. Gershinkova D. Unresolved issues of Article 6 of the Paris Agreement – is a compromise possible in Glasgow? // *International Organizations Research Journal*. 2021. V. 16. No. 3. P. 69–84. doi: 10.17323/1996-7845-2021-03-03

8. De Andrade Correa F., Voigt C. The Paris Agreement and net-zero emissions: what role for the land-sector? // *Carbon Clim. Law Rev.* 2021. V. 15. No. 1. P. 1–12. doi: 10.21552/cclr/2021/1/3

9. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A. On the potential of greenhouse gas absorption by forests of Russia to reduce the carbon footprint of domestic products export // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 499. No. 2. P. 181–184 (in Russian). doi: 10.31857/S2686739721080120

10. Zwick S. Article 6 and its Glasgow Rulebook: the basics [Internet resource] <https://www.ecosystemmarketplace.com/articles/article-6-and-its-glasgow-rulebook-the-basics/> (Accessed: 09.03.2022).

11. Gordeeva E.M., Vedernikova I.E. Forest carbon projects in Russia: current legal infrastructure // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 209–215 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-209-215

12. Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat [Internet resource] https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/current_convention_text_e.pdf (Accessed: 04.07.2023).

13. Assessment on peatland, biodiversity and climate change. Main Report / Eds. F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, L. Stringer. Wageningen: Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, 2008 [Internet resource] <https://globalclimateactionpartnership.org/app/uploads/2015/12/Assessment-on-peatlands-biodiversity-and-climate-change-main-report.pdf> (Accessed: 04.07.2023).

14. Gordeeva Y., Bakhtina I., Fursa Yu., Shakhmatov K., Belik A. Wetlands – a new direction for the implementing climate projects in Russia // *Klimaticheskij vestnik*. 2023. No. 11. P. 3–7 (in Russian).

15. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baibar A.S. The role of forests in the implementation of Russia's Low-Carbon Development Strategy // *Doklady*

Earth Sciences. 2022. V. 507. P. 981–985. doi: 10.1134/S1028334X22700465

16. Resolution XIV.20. The Ramsar Convention's response to environmental emergency in Ukraine relating to the damage of its Wetlands of International Importance (Ramsar Sites) stemming from the Russian Federation's aggression [Internet resource] https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/xiv.20_ukraine_e.pdf (Accessed: 04.07.2023).

17. Preserve Russia's membership in the Ramsar Convention asks the head of the Ministry of Foreign Affairs Expert Council on Nature Reserves [Internet resource] <https://zapovedcouncil.ru/sohranit-chlenstvo-rossii-v-ramsarskoj-konvenczii-prosit-glavu-mid-ekspertnyj-sovet-po-zapovednomu-delu/?ysclid=m0nku-eevzp279019364> (Accessed: 04.07.2023)

18. Orlov T.V., Shakhmatov K.L. Efficiency analysis of rewetting peatbogs in Tver oblast on the basis of remote sensing data // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020. No. 6. P. 74–82 (in Russian). doi: 10.31857/S0869780920060089

19. Günther A., Barthelmes A., Huth V., Joosten H., Jurasinski G., Koebisch F., Couwenberg J. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. Article No. 1644. doi:10.1038/s41467-020-15499-z

20. Joosten H., Tapio-Biström M.L., Tol S. Peatlands – guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use. Mitigation of climate change in agriculture. Series 5. 2012. 114 p. [Internet resource] <https://www.fao.org/3/i3013e/i3013e.pdf> (Accessed: 20.02.2024).

21. Sirin A.A., Medvedeva M.A., Itkin V.Yu. Rewetting of disused drained peatlands and reduction of greenhouse gas emissions // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*.

2023. V. 87. No. 4. P. 597–618 (in Russian). doi: 10.31857/S258755662304012X

22. Tuittila E.S., Vasander H., Laine J. Impact of rewetting on the vegetation of a cut-away peatland // *Appl. Veg. Sci.* 2000. V. 3 (2). P. 205–212. doi: 10.2307/1478999

23. Richert M., Dietrich O., Koppisch D., Roth S. The influence of rewetting on vegetation development and decomposition in a degraded fen // *Restor. Ecol.* 2000. V. 8. No. 2. P. 186–195. doi: 10.1046/j.1526-100x.2000.80026.x

24. Van Dijk J., Stroetenga M., Van Bodegom P.M., Aerts R. The contribution of rewetting to vegetation restoration of degraded peat meadows // *Appl. Veg. Sci.* 2007. V. 10. No. 3. P. 315–324. doi: 10.1111/j.1654-109x.2007.tb00430.x

25. Peacock M., Evans C.D., Fenner N., Freeman C. Natural revegetation of marsh pools after peatland restoration involving ditch blocking – the influence of pool depth and implications for carbon cycling // *Ecol. Eng.* 2013. V. 57. P. 297–301. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.055

26. Natural climate solutions. Review of international approaches. 2022 [Internet resource] <https://www.economy.gov.ru/material/file/4cc45c240a939c79ffd2ca08b0d57715/071122.pdf> (Accessed: 05.07.2023).

27. Strack M., Davidson Sc.J., Hirano T., Dunn Ch. The potential of peatlands as nature-based climate solutions // *Curr. Clim. Change Rep.* 2022. V. 8. P. 71–82. doi: 10.1007/s40641-022-00183-9

28. Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. Article No. 1071. doi: 10.1038/s41467-018-03406-6

29. Nugent K., Strachan I., Roulet N., Strack M., Frolking S., Helbig M. Prompt active restoration of peatlands substantially reduces climate impact // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. Article No. 124030. doi: 10.1088/1748-9326/ab56e6

Четвёртая «Менделеевская экологическая экспедиция. Камчатка»

© 2024. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

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: ecolab2@gmail.com

The fourth “Mendeleev Ecological Expedition. Kamchatka”

© 2024. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Vyatka State University,

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

²Institute 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

Образовательный проект «Менделеевские классы» реализуется госкорпорацией «Росатом» совместно с РХТУ им Д.И. Менделеева в регионах (Кировская, Курганская, Саратовская, Иркутская, Томская, Нижегородская области и Удмуртская Республика), где создаётся современная инфраструктура для обращения с отходами I и II классов опасности, в рамках национального проекта «Экология». Основная цель данного проекта – внедрение передовых образовательных программ для развития науки и кадрового потенциала в сфере экологии через сетевое взаимодействие с вузами и предприятиями, систему предпрофессиональной подготовки и раннюю профориентацию школьников. Учащиеся «Менделеевских классов» углублённо изучают химию, математику, слушают лекции преподавателей вузов, проводят лабораторные работы, участвуют в разработке исследовательских проектов в области экологии и принимают участие в выездных образовательных мероприятиях. По результатам исследовательской проектной работы победители конкурса, пройдя экспертную оценку на региональном (в школе) и федеральном уровне на базе РХТУ им. Д.И. Менделеева, получают возможность принять участие в «Менделеевской экологической экспедиции».

С 2021 г. в рамках проекта «Менделеевские классы» состоялось уже три Менделеевские экологические экспедиции: «Байкал», «Фин-

ский залив», «Южный Урал», в ходе которых более 200 учащихся и студентов посетили крупнейшие объекты накопленного вреда окружающей среде, которые ликвидирует госкорпорация «Росатом», и сравнивали их с эталонными участками экосистем при посещении природных заказников и заповедников данных регионов.

В 2024 г. «Менделеевская экологическая экспедиция» проведена на Камчатке и стала частью Всероссийского молодёжного экологического форума «Экосистема. Заповедный край». Экспедиция была организована госкорпорацией «Росатом» при содействии АНО «Энергия Развития», сети информационных центров по атомной энергии (ИЦАЭ), ФГУП «Федеральный экологический оператор» и вузов Федерального научно-образовательного консорциума «Передовые ЭкоТехнологии», который создан и активно действует с 2020 г.

В состав «Менделеевской экологической экспедиции» в 2024 г. вошли более 80 школьников, студентов и преподавателей из числа участников образовательного проекта «Менделеевские классы». Участниками экспедиции стали учащиеся, студенты, учителя, преподаватели вузов Консорциума «Передовые ЭкоТехнологии» из 6 регионов: Иркутской области (г. Иркутск, г. Усолье-Сибирское), Кировской (г. Киров, пгт. Мирный), Курганской (г. Курган, г. Щучье), Нижегородской (г. Дзержинск), Саратовской (г. Саратов,

пгт. Михайловский) и Республики Удмуртия (г. Ижевск, г. Камбарка). Кроме того, к «менделеевцам» впервые присоединились победители Всероссийского конкурса «Большая перемена». В результате впервые в экспедиционной программе участвовали представители 18 городов из 12 регионов.

Программа «Менделеевской экологической экспедиции», спланированная с 12 по 18 августа на территории Камчатского края, была очень насыщенной и включала широкий спектр интереснейших мероприятий в области образовательной, научно-исследовательской деятельности. Для «менделеевцев» были организованы интеллектуальные игры, мастер-классы с ведущими экспертами и экскурсионная программа по удивительному камчатскому региону, где они совершили восхождение на вулкан Горелый (1829 м над уровнем моря) и посетили берег Тихого океана и Халактырский пляж.

В первый день экспедиции «менделеевцы» взяли пробы прибрежной почвы, воды и донных отложений из оз. Микижа в Паратунской долине. Увидели на береговой линии огромные заросли борщевика. На Камчатке встречается два вида: борщевик шерстистый и борщевик Сосновского. Первый хорошо знаком жителям, в обиходе его называют «пучкой». А второй – это чужеродный инвазивный вид. Около 30 лет назад его пробно начали выращивать на полуострове на корм для сельскохозяйственных животных. Эксперимент себя не оправдал. Сегодня с борщевиком Сосновского, который продолжает распространяться в Петропавловск-Камчатской агломерации, ведётся борьба. Участников экспедиции удивили огромные заросли золотарника, иванчая, шиповника высотой до 1,5–2 м. Широкий спектр разнотравья включает многие виды лекарственных растений: тысячелистника, цикория, зверобоя, подорожника, одуванчика. Треть площади полуострова занимают леса. Основными видами деревьев, произрастающими на Камчатке, являются каменная берёза, белая берёза, лиственница курильская, ель, ольха, чозения, тополь, ива, рябина древовидная, осина, черёмуха, боярышник, а из кустарниковых – стланики ольховый и кедровый. На береговой территории оз. Микижа «менделеевцы» обратили внимание на весьма не ровные, порой зигзагообразные стволы деревьев – берёзы, осины, ивы и тополя, основной причиной данного явления являются климатические условия. Заметили на деревьях обилие кустистых и накипных

лишайников, что свидетельствует о чистоте атмосферного воздуха. Ключевым мероприятием в этот день стало открытие «Менделеевской экологической экспедиции 2024».

Купаться в водах Тихого океана было запрещено, так как сильные волны далеко разливаются, и температура воды всего 4–5 °С. Тем не менее, с помощью тренирующихся спортсменов, удалось отобрать пробы морской воды, а участники экспедиции отобрали пробы берегового песка, чёрный цвет которого удивил всех. Чёрный песок – это застывшая вулканическая лава. Давным-давно её горячий поток, сметающий на своём пути всё живое, дошёл до берега, опустился в холодные воды Тихого океана и застыл. Вода, ветер и время постепенно раздробили её на части и превратили в мелкий песок.

Самым сложным и трудным был день восхождения на вулкан Горелый на южных просторах Камчатки. Во время восхождения взору открывались прекрасные пейзажи, а когда поднялись, увидели очень красивый кратер с голубым озером, сфотографировались на фоне Вилючинской сопки, насладились высотой тридцатиметрового водопада Снежный барс. С вулкана принесли в лабораторию на анализ пробы грунта, воды из озера и водопада.

Очень интересной и полезной для «менделеевцев» была экскурсия по городу Петропавловску-Камчатскому – столице Камчатского края, одному из первых русских городов Дальнего Востока. Но столицей Камчатки Петропавловск стал лишь в 1812 г., и, несмотря на новый статус, ещё долгое время оставался малолюдным и состоял из одной улицы с деревянными зданиями. К середине XIX века в нём проживало всего полторы тысячи человек, в основном это были военные и служащие с семьями. Этот небольшой город проявил героизм и упорство в ожесточенных боях с англо-французским флотом, почти втрое превосходившим его. Во время советской индустриализации город был переименован в Петропавловск-Камчатский и стал развиваться как промышленный центр полуострова: в нём построили механический завод и судоремонтную верфь. В 1930-е годы в городе открылось отделение Научного института рыбного хозяйства и океанографии, начал работать первый профессиональный театр. Во время Второй мировой войны Петропавловск-Камчатский был стратегическим центром в противостоянии с Японией. Здесь в 1945 г. был сформирован Курильский десант, выбивший войска неприятеля с

островов Парамушир и Шумшу. После войны Петропавловск-Камчатский активно развивался и расширялся: открывались новые высшие учебные заведения, музеи, культурные центры, строились современные здания. К городу присоединялись соседние посёлки, население стремительно росло и к девяностым годам достигло своего пика – 270 тыс. человек.

В течение всей недели «менделеевцы» принимали участие в научно-исследовательской деятельности. Отбирали пробы воды из океана, водопада и ледника, пробы почв, в том числе у подножия из кратера вулкана, морского песка. В лабораторных условиях провели физико-химические и биологические исследования отобранных проб воды, донных отложений и почвы, определяли под микроскопом различные виды зообентоса, водорослей, простейших. По итогам исследований «менделеевцы» подготовили презентации и представили свои результаты на закрытии «Менделеевской экологической экспедиции», которую посетили Губернатор Камчатского края В.В. Солодов, первый заместитель генерального директора – директор блока по развитию и международному бизнесу «Росатома» К.Ф. Комаров и директор направления по реализации государственных и отраслевых проектов в сфере экологии госкорпорации «Росатом» А.В. Лебедев.

В своём приветствии участников экспедиции губернатор Камчатского края Владимир Викторович Солодов отметил: «Камчатка – это территория, созданная для изучения и открытий. Она является настоящей природной лабораторией и представляет огромный научный интерес, её природная ценность имеет поистине планетарный масштаб, и я хочу надеяться, что вы прониклись энергией и силой этих мест, открыли для себя что-то новое, общаясь с нашей природой. Формируя свой собственный опыт научно-исследовательской деятельности, участвуя в полевых и лабораторных работах на неповторимых и заповедных местах, вы ещё раз убедились в важности бережного и рационального отношения к богатствам природы».

Кирилл Фёдорович Комаров рассказал о том, что в «Росатоме» работает почти 400 тыс.

человек, и ежегодно к ним на работу приходят тысячи молодых людей, которые заканчивают учебные заведения. «В какой-то момент мы задумались, что кроме юных атомщиков, нам нужны ещё и юные химики, потому что для них огромное количество работы и по нашему традиционному атомному профилю, и, например, в сфере управления отходами и очистки воды. Главная задача – создавать «окна возможностей», чтобы каждый юный эколог мог получить нужный старт и пройти первые несколько шагов на пути к мечте вместе с «Росатомом». И хотелось бы, чтобы находясь здесь, среди уникальной красоты Камчатского края, вы ещё раз задумались и осознали, насколько от каждого из нас зависит, чтобы эта красота осталась первозданной».

«В этом году «Менделеевская экологическая экспедиция» стала достойной частью Всероссийского молодёжного форума «Эко-система. Заповедный край». Верю, что наш проект даёт хороший импульс ребятам, чтобы определиться и, возможно, связать жизнь с экологией. Сегодня в России зарождается новая отрасль управления наиболее сложными промышленными отходами. И, реализуя такие проекты, как «Менделеевские классы», мы формируем потенциал для обеспечения этой отрасли высококвалифицированными специалистами», – отметил директор направления по реализации государственных и отраслевых проектов в сфере экологии госкорпорации «Росатом» Андрей Владимирович Лебедев.

В заключение с обращением к участникам экспедиции выступили научные руководители образовательной и исследовательской деятельности «менделеевцев» Т.Я. Ашихмина, профессор ВятГУ, и Е.И. Тихомирова, профессор СГТУ им. Гагарина Ю.А. Представители руководства госкорпорации «Росатом» вручили организаторам «Менделеевской экологической экспедиции» дипломы, благодарственные письма и отметили, что данная работа по предпрофессиональной подготовке и ранней профориентации школьников в «Менделеевских классах» будет продолжена.

Четвёртая «Менделеевская экологическая экспедиция. Камчатка», 2024 г.



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004