



2024

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 2

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>

*Елена Ковалева,
глава города
Кирова*



В этом году Кирову исполняется 650 лет. Годом его основания считается 1374-й. В течение почти двухсот лет город носил название Хлынов, затем в 1780-м был переименован в Вятку, а своё современное название получил в 1934 г. За эти годы он прошёл путь от небольшого поселения на берегу р. Вятки до полумиллионного города – одного из самых крупных на северо-востоке России.

Довоенные годы. Вместе со всей страной Хлынов – Вятка – Киров пережил славные и трагические страницы, яркие и незабываемые события. Каждый период развития города отмечен важными вехами. В XVII в. Хлынов был самым крупным городом на северо-востоке европейской России и немногим уступал центральным: в нём проживали 4400 человек, которые оставили неизгладимый след в его истории и судьбах горожан. В 1781 г. Вятка стал главным городом губернии. Основу его экономики составляли производство продуктов сельского хозяйства и их переработка. После Октябрьской революции Вятка постепенно превращается в промышленный центр, становится важнейшим железнодорожным узлом, связавшим Москву, Урал, Сибирь и Архангельск. В 1936 г. была образована Кировская область, центром которой становится г. Киров.

Годы Великой Отечественной войны. Великая Отечественная война стала трагическим событием для всей страны. Только за первую неделю войны три тысячи кировчан ушли на фронт добровольцами. Более шестисот тысяч наших земляков сражались за Родину с оружием в руках. В Киров были эвакуированы крупные машиностроительные предприятия: заводы им. Лепсе и им. Дзержинского (ныне АО «Электромашиностроительный завод «Лепсе»), завод № 537 (ныне ПАО «Кировский завод «Маяк»), завод № 32 (ныне АО «ВМП «АВИТЕК») – всего 70 предприятий из Москвы, Ленинграда, Ярославля и других городов. Все заводы Кирова перешли на выпуск военной продукции. Здесь изготавливали миномёты, мины, снаряды, ручные и противотанковые гранаты, танки, самоходные установки, легендарные «Капоши», вооружение для самолётов, оптические приборы для артиллерии, азросани, торпедные

ката, сотни наименований стрелкового и прочего оружия. Всего за годы войны кировчане дали армии более 4 тыс. танков, 2 тыс. «Капош», 3 млн снарядов, 5 млн мин и авиабомб, 33 млн гранат, 200 кораблей, 5 млн автоматов. В нашем городе шили обмундирование для красноармейцев: обувь, одежду, шапки, рукавицы. Женщины и подростки заменили мужчин у заводского станка, на колхозном поле, лесозаготовках. Люди работали без сна и отдыха. Кировчане горячо заботились о раненых, а также о детях и семьях фронтовиков, эвакуированных в область из Ленинграда и других районов страны. У Кирова нет боевых наград, однако он по праву является городом трудовой доблести. Это почётное звание присвоено ему Указом Президента Российской Федерации в 2021 г. и стало признанием подвига кировчан – тружеников тыла в годы Великой Отечественной войны.

Современное время. К началу XXI в. город стал крупным промышленным, транспортным, образовательным и культурным центром. В Кирове имеется широкая сеть высших учебных заведений, три театра, множество музеев и библиотек. Кировские предприятия известны в России и за её пределами продукцией авиа- и станкостроения, тяжёлого машиностроения, деревообрабатывающей, лёгкой и пищевой промышленности. Развито производство товаров народных промыслов: дымковской игрушки, изделий из капокорня и бересты. Город стремительно преобразуется. Строятся новые микрорайоны, школы, детские сады, спортивные объекты, благоустраиваются парки и скверы, ремонтируются дороги и пешеходные зоны. Всё это не просто делает Киров более красивым и современным, но и повышает уровень комфортного проживания жителей столицы региона.

Киров готовится достойно встретить своё 650-летие. В рамках подготовки к юбилею отпрезентированы Приказная изба, музей К. Э. Циолковского, здания Художественного музея, драматического театра, Репинского особняка, музея им. А. С. Грина, Вятского художественного училища, музея М. Е. Салтыкова-Щедрина и другие объекты культурного наследия. Масштабные работы проводятся в Александровском саду и парке им. С. М. Кирова. Началась подготовка к установке памятника святому благоверному князю Александру Невскому на площади перед Вятской филармонией.

Главным богатством Кирова всегда были люди. Наш город прославили космонавты и врачи, педагоги и спортсмены, учёные и писатели, руководители предприятий и общественные деятели, экономисты и работники культуры. Их имена навсегда вписаны в историю города благодаря серии книг о почётных гражданах Кирова, которая продолжает пополняться новыми изданиями. И сегодня Киров остаётся городом тружеников – людей, которые своими руками создают не только его настоящее, но будущее. Новые поколения кировчан сохраняют и приумножают всё, что было оставлено в наследство нашими предками.



Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 2, 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 (№2633 по состоянию на 27.05.2024).

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, фотография на 1-й обложке – Александр Широких,
администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,

выпускающий редактор – Мария Зелаева.
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 25.06.2024.

Тираж 250 экз. Заказ № 3152. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография»

Адрес типографии: 610017, Кировская область,

г. Киров, ул. Труда, 84а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор,
научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- 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. 2, 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 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: June 25, 2024.

Circulation 250 copies. Order No. 3152. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD

Printing Address: 84a, Truda 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

И. Г. Широких, А. А. Широких Потенциал биоразложения пластика базидиальными грибами и актинобактериями (обзор) 6

СТАТЬИ

В. В. Тужилкина Фотосинтетическая активность подростка хвойных в связи с промышленными рубками 22

А. П. Шевырногов, А. А. Ларько, Г. С. Высоцкая, Т. И. Письман, Л. А. Сомова Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе по данным спутниковых наблюдений ... 29

Т. Э. Абашев, Т. Я. Ашихмина, М. Х. Хето Сравнительная экологическая оценка техногенного воздействия на воздушный бассейн территории Кировской области 35

А. А. Дитц, Т. Н. Конакова, А. А. Фатеева Трансформация почвенных зооценозов в первый год после рубки леса 48

Е. А. Юшкова *Drosophila melanogaster* как модель *in vivo* для оценки цитогенетических эффектов низкоинтенсивного ионизирующего излучения 57

А. В. Горбунов, Д. Б. Петренко, А. А. Дронова Некоторые закономерности накопления микроэлементов в листьях липы (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы (*Betula alba* L.) 63

И. А. Лиханова, С. В. Денева, Ю. В. Холопов, Е. А. Рудь, Е. А. Скребенков, Е. М. Лаптева Особенности лесных подстилок в разных типах среднетаёжных лесов 72

О. А. Липатникова, Т. Н. Лубкова, О. В. Солодянкина Геохимическая характеристика озера Чваниха, памятника природы Кировской области 82

И. Е. Тарганов, А. Л. Гакиев, А. А. Кадирбеков, И. Д. Трошкина, Н. А. Бектенов, А. Г. Чередишченко Адсорбционное извлечение аминов из водных растворов 91

Ф. В. Юсубов, И. А. Алиев, С. Н. Пулиева Исследование адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарности 101

А. В. Сазанов, М. Л. Сазанова, И. А. Жуйкова, Л. В. Тугаринов Оценка химического состава сапропелей различных месторождений 108

Т. Ю. Коршунова, Е. В. Кузина, С. Р. Мухаматдьярова, Ю. Ю. Шарипова, М. Г. Искужина Бактерии-деструкторы с ростстимулирующими свойствами для использования в экологической биотехнологии 117

Е. В. Гаевая, Л. В. Рудакова Исследование закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе их утилизации 125

М. Н. Барамзин, С. Г. Литвинец, Е. А. Мартинсон Получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов для промышленного производства высокоэффективного биосурфактанта 135

А. Д. Батаков, А. П. Кирюшина, Д. Н. Маторин, В. А. Терехова Антибиотик ципрофлоксацин в водных и почвенных средах: реакция микроводорослей 143

Е. А. Тишина, Т. С. Дроганова, Л. В. Поликарпова, Н. В. Васильев Влияние фосфорсодержащих пестицидов на ферментативную активность и множественные формы кислой фосфатазы живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) 151

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

**ЭКОТОКСИ-
КОЛОГИЯ**

- A. P. Galyperina* Пигментная система нитчатых цианобактерий в условиях аккумуляции ионов свинца 159
Л. С. Тупицына, Е. О. Волкова, С. С. Тупицын, З. В. Шейкина Цитогенетические последствия воздействия бензина на *Lepidium sativum* L. 167

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

- A. I. Fazlutdinova, N. V. Sukhanova, L. A. Gaysina* Diversity of soil diatom communities of Frolikhinsky State Nature Reserve 175
С. П. Маслова, О. В. Дымова, Р. В. Малышев, И. В. Далькэ Функциональные характеристики почек возобновления *Heracleum sosnowskyi* Manden. в период подготовки к перезимовке 185
Л. М. Абрамова, И. В. Тания, А. Н. Мустафина Некоторые особенности биологии редкого эндемичного вида *Arafloe aromatica* Rimenov & Lavrova на территории Рицинского реликтового национального парка (Республика Абхазия) 193

**ЭКОЛОГИЯ
И КЛИМАТ**

- Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Е. П. Колеватых, Т. Я. Ашихмина* Биологическое загрязнение почв побочными продуктами животноводства 201
И. В. Зацаринный, У. Ю. Шаврина, Е. В. Валова, О. В. Натальская Фауна и население птиц гористых районов южного берега Варангерфьорда 211

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

- О. В. Калабин, Ф. Б. Литвин, Т. М. Брук, И. В. Быкова, Е. В. Удовенко* Влияние загрязнённой радионуклидами среды на сердечный ритм детей в современных условиях 219

ХРОНИКА

- Т. Я. Ашихмина* Педагогическая династия – гордость системы образования 226
Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина Конкурс как средство формирования креативного потенциала личности 228
Т. Я. Ашихмина, М. Л. Сазанова Экология родного края: проблемы и пути их решения 230

CONTENTS**REVIEWS**

- I. G. Shirokikh, A. A. Shirokikh* The potential of plastic biodegradation by basidial fungi and actinobacteria (review) 6

ARTICLES**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**

- V. V. Tuzhilkina* Photosynthetic activity of coniferous undergrowth after industrial felling 22
A. P. Shevyrnogov, A. A. Larko, G. S. Vysotskaya, T. I. Pisman, L. A. Somova Monitoring the boundaries of terrestrial biomes on a global scale from data satellite observations 29
T. E. Abashev, T. Ya. Ashikhmina, M. H. Kheto Ecological assessment of technogenic impact on the air basin of the Kirov region 35
A. A. Ditts, T. N. Konakova, A. A. Fateeva Transformation of soil macrofauna in the first year after deforestation 48
E. A. Yushkova *Drosophila melanogaster* as an *in vivo* model for assessing the cytogenetic effects of low-intensity ionizing radiation 57
A. V. Gorbunov, D. B. Petrenko, A. A. Dronova Some patterns of the accumulation of trace elements in the leaves of linden (*Tilia cordata* Mill.) and birch (*Betula alba* L.) 63
I. A. Likhanova, S. V. Deneva, Yu. V. Kholopov, E. A. Rud, E. A. Skrebenkov, E. M. Lapteva Litter features in different forest types in the middle taiga subzone 72

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

O. A. Lipatnikova, T. N. Lubkova, O. V. Solodyankina
Geochemical characteristics of the Lake Chvanikha,
the natural monument of the Kirov region 82

**ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION**

*I. E. Targanov, A. L. Gakiev, A. A. Kadirbekov,
I. D. Troshkina, N. A. Bektenov, A. G. Cherednichenko*
Adsorption recovery of amines from water solutions 91
F. V. Yusubov, I. A. Aliyev, S. N. Guliyeva Study
of adsorption separation of gas mixtures under
non-stationary conditions 101

AGROECOLOGY

*A. V. Sazanov, M. L. Sazanova, I. A. Zhuikova,
L. V. Tugarinov* Chemical composition assessment
of sarpopels from different deposits 108

**REMEDICATION
AND RECULTIVATION**

*T. Yu. Korshunova, E. V. Kuzina, S. R. Mukhamatdyarova,
Yu. Yu. Sharipova, M. G. Iskuzhina* Bacteria-destroyers
with growth-stimulating properties for use
in ecological biotechnology 117
E. V. Gaevaya, L. V. Rudakova Study of patterns
of changes in salt composition drill cuttings in the process
of their disposal 125
M. N. Baramzin, S. G. Litvinets, E. A. Martinson Obtaining
heterological rhamnolipid producers for industrial production
of highly-effective biosurfactant 135

ECOTOXICOLOGY

*A. D. Batakov, A. P. Kiryushina, D. N. Matorin,
V. A. Terekhova* Antibiotic ciprofloxacin in water
and soil media: reaction of microalgae 143
*E. A. Tishina, T. S. Drozanova, L. V. Polikarpova,
N. V. Vasiliev* Effect of phosphorus-containing pesticides
on the enzymatic activity and multiple forms of acid
phosphatase of river snail (*Viviparus viviparus* L.) 151
A. R. Galperina Pigment system of filamentous
cyanobacteria under conditions of accumulation of lead ions 159
L. S. Tupicyna, E. O. Volkova, S. S. Tupitsin, Z. V. Shejkina
Cytogenetic aftermath by gasoline impact
on *Lepidium sativum* L. 167

**POPULATION
ECOLOGY**

A. I. Fazlutdinova, N. V. Sukhanova, L. A. Gaysina
Diversity of soil diatom communities
of Frolikhinsky State Nature Reserve 175
S. P. Maslova, O. V. Dymova, R. V. Malyshev, I. V. Dalke
Functional characteristics of *Heracleum sosnowskyi* Manden.
terminal buds during preparation for overwintering 185
L. M. Abramova, I. V. Taniya, A. N. Mustafina Some features
of the rare endemic *Arafoe aromatica* Pimenov & Lavrova
biology in Ritsa Strict Nature Reserve (Republic of Abkhazia) 193

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

N. V. Syrchina, L. V. Pilip, E. P. Kolevatykh, T. Ya. Ashikhmina
Biological contamination of soils by livestock by-products 201
*I. V. Zatsarinny, U. Y. Shavrina, E. V. Valova,
O. V. Natal'skaya* Fauna and bird population
of the mountainous areas of the Varangerfjord southern coast.. 211

SOCIAL ECOLOGY

*O. V. Kalabin, F. B. Litvin, T. M. Bruk, I. V. Bykova,
E. V. Udovenko* The effect of radionuclide-contaminated
environment on children's heart rate 219

CHRONICLE

T. Ya. Ashikhmina The pedagogical dynasty is the pride
of the education system 226
N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina Competition as a means
of developing the creative potential of an individual 228
T. Ya. Ashikhmina, M. L. Sazanova Ecology
of the native land: problems and solutions 230

Потенциал биоразложения пластика базидиальными грибами и актинобактериями (обзор)

© 2024. И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., в. н. с., профессор,
А. А. Широких², 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,

e-mail: irgenal@mail.ru

В условиях постоянно растущего производства и потребления пластмасс недостаточное управление пластиковыми отходами и их ненадлежащая утилизация представляют значительную угрозу для окружающей среды, оказывает влияние на все формы жизни, природные экосистемы и экономику во всём мире. В условиях этой угрозы поиск альтернативных экологически безопасных решений, таких как биodeградация вместо традиционной утилизации, имеет первостепенное значение. Знания о механизмах и эффективности биodeградации пластмасс на сегодняшний день сфокусированы, в основном, на таких группах микроорганизмов, как грамотрицательные бактерии и грибы аскомицеты. Целью данного обзора является анализ имеющихся в литературе представлений о потенциальной возможности разложения наиболее распространённых пластиковых отходов (полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида, полиэтилентерефталата, полиуретана и др.) в результате биотических процессов, осуществляемых двумя группами организмов, которые в технологиях переработки и утилизации синтетических пластиков до сих пор не нашли практического применения – базидиальными грибами и актинобактериями. Обсуждается способность конкретных представителей этих таксономических групп разлагать различные синтетические полимеры. Рассмотрены уникальные стратегии базидиальных грибов, включающие мощную ферментативную систему, способность к адсорбции и производству природных биосурфактантов – гидрофобинов, которые позволяют грибам использовать пластики в качестве источника углерода и энергии. Охарактеризован возможный вклад в основном термофильных представителей актинобактерий родов *Thermobifida*, *Thermoactinomyces*, *Thermomonospora*, *Saccharomonospora*, *Actinomadura*, *Microbispora* и *Streptomyces* в улучшение утилизации пластиковых отходов с целью создания эффективной и устойчивой практики обращения с пластмассами.

Ключевые слова: загрязнение, пластиковые отходы, биodeградация, микроорганизмы, ферментативные системы.

The potential of plastic biodegradation by basidial fungi and actinobacteria (review)

© 2024. I. G. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-3319-2729¹

A. A. Shirokikh² ORCID: 0000-0002-7808-0376²

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

²Vyatka State University,

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

e-mail: irgenal@mail.ru

With the ever-increasing production and consumption of plastics, inadequate management of plastic waste and its improper disposal pose a significant threat to the environment, affecting all forms of life, natural ecosystems and economies worldwide. In the face of this threat the search for alternative environmentally friendly solutions such as biodegradation instead of traditional recycling is of paramount importance. Currently knowledge about the mechanisms and effectiveness of plastics biodegradation is focused mainly on such groups of microorganisms as Gram-negative bacteria and fungi ascomycetes. The aim of this review is to highlight the ideas available in the literature about the potential decomposition of the most common plastic waste (polyethylene, polypropylene, polyvinyl chloride, polyethylene terephthalate and

polyurethane) as a result of biotic processes. Basidial fungi and actinobacteria have not yet found practical application in the technologies of processing and utilization of synthetic plastics. We discuss the ability of specific representatives of the two above taxonomic groups to decompose various synthetic polymers. The unique strategies of basidial fungi such as a powerful enzymatic system, the ability to absorb and produce natural biosurfactants – hydrophobins, allowed fungi to use plastics as a source of carbon and energy are considered. The possible contribution of mainly thermophilic actinobacteria of the genera *Thermobifida*, *Thermoactinomyces*, *Thermomonospora*, *Saccharomonospora*, *Actinomadura*, *Microbispora* and *Streptomyces* in improving the plastic waste disposal in order to create effective and sustainable plastic management practices has been characterized.

Keywords: pollution, plastic waste, biodegradation, microorganisms, enzymatic systems.

С тех пор, как в 1907 г. Лео Бакеландом был произведён первый синтетический полимер – бакелит [1], человечеству потребовалось совсем немного времени, чтобы начать массовое производство других видов синтетических полимеров, которые широко используются в современном мире. Для замены таких традиционных материалов, как дерево, стекло и металлы были разработаны и нашли применение в разных областях пластмассы с различными свойствами, что обеспечило современному обществу широкий спектр удобств и комфорта, невиданных ранее в истории человечества. По мере того, как индустриализация охватывает всё больше стран, потребность человечества в пластиковых полимерах неуклонно возрастает. Это связано не только с развитием промышленности и обеспечением удобства всех аспектов жизни человека, но и постоянным повышением санитарных стандартов. В основном – это пластик одноразового использования, который применяется в пищевой промышленности для упаковки продуктов и производства одноразовых столовых приборов и контейнеров для напитков; и в секторе здравоохранения, где пластик стал практически незаменим. Одноразовый медицинский инструментариий снижает уровень перекрёстного инфицирования, благодаря простоте утилизации одноразовых шприцев и других изделий медицинского назначения. Пандемия COVID 19 привела к увеличению использования одноразовых средств индивидуальной защиты, что усугубило загрязнение пластиком окружающей среды (ОС) [2]. Большинство одноразовых масок и средств индивидуальной защиты состоят из различных полимерных веществ, таких как полипропилен, полиуретан, полиакрилонитрил, полиэтилен и полистирол. Из-за экономичности производства, а также благодаря разнообразию полимеров, пластик широко используется также в изготовлении различных электронных устройств, туалетных принадлежностей, мебели, текстиля, транспортных средств и других самых разнообразных предметов.

Однако особые свойства (малый вес, низкие требования к техническому обслуживанию, устойчивость к атмосферным воздействиям, инертность, долговечность, прочность, универсальность и низкая стоимость), которые делают пластик привлекательным в повседневном использовании, создают угрозу экологической устойчивости нашей планеты. Пластмассы слабо поддаются биологической деградации, устойчивы к коррозии и химическому разложению. Мировое годовое производство пластмасс ежегодно увеличивается примерно на 3% и к 2016 г. достигло 322 млн т [3], а с учётом производства пластиковых волокон, этот показатель приближается к 393 млн т, что соизмеримо с глобальной биомассой человека, как биологического вида [4].

Исходя из характера реакции на высокотемпературное воздействие, синтетические полимеры классифицируют как реактопласты и термопласты. Реактопласты имеют сетчатую структуру и затвердевают непосредственно в процессе их изготовления. Этот процесс необратим: при повторном нагревании реактопласты остаются в твёрдом состоянии. Термопласты, имеющие линейную структуру, при нагревании размягчаются и плавятся. При низких температурах термопласты снова становятся твёрдыми. Процесс нагрева и охлаждения может происходить многократно.

Наиболее производимыми термопластами являются полиэтилен высокой и низкой плотности (HDPE и LDPE) и полипропилен (PP) (полиолефины), за которыми следуют поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилентерефталата (ПЭТ) (рис. 1, см. цв. вкладку I).

По прогнозным оценкам ООН, производство пластмасс может удвоиться к 2035 г., достигнув 800 млн т, и 1600 млн т к 2050 г. Примерно 90% изделий, изготовленных из пластика, используются один раз, а затем выбрасываются. Начиная с 2020 г., в ОС ежегодно поступает более 400 т пластиковых отходов [5] и к 2050 г. в ОС их будет находиться около 12000 млн т [6].

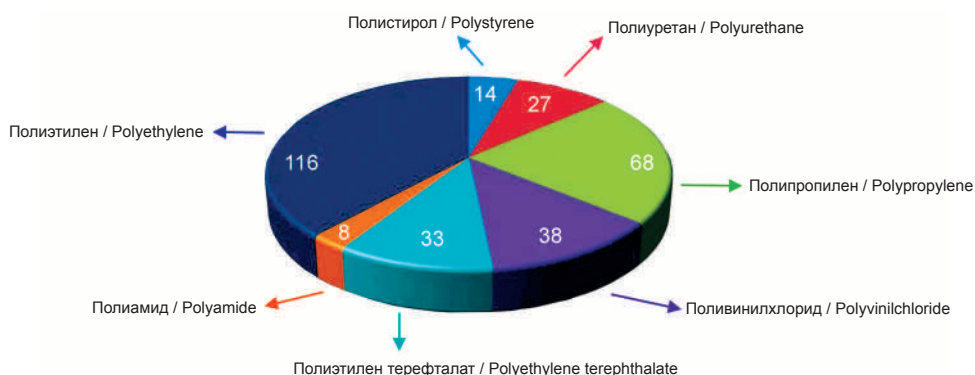


Рис. 1. Мировое производство разных типов синтетических полимеров, млн тонн (<http://www.ilocis.org/documents/chpt77e.htm>)
 Fig. 1. Global production of various types of synthetic polymers, million tons (<http://www.ilocis.org/documents/chpt77e.htm>)

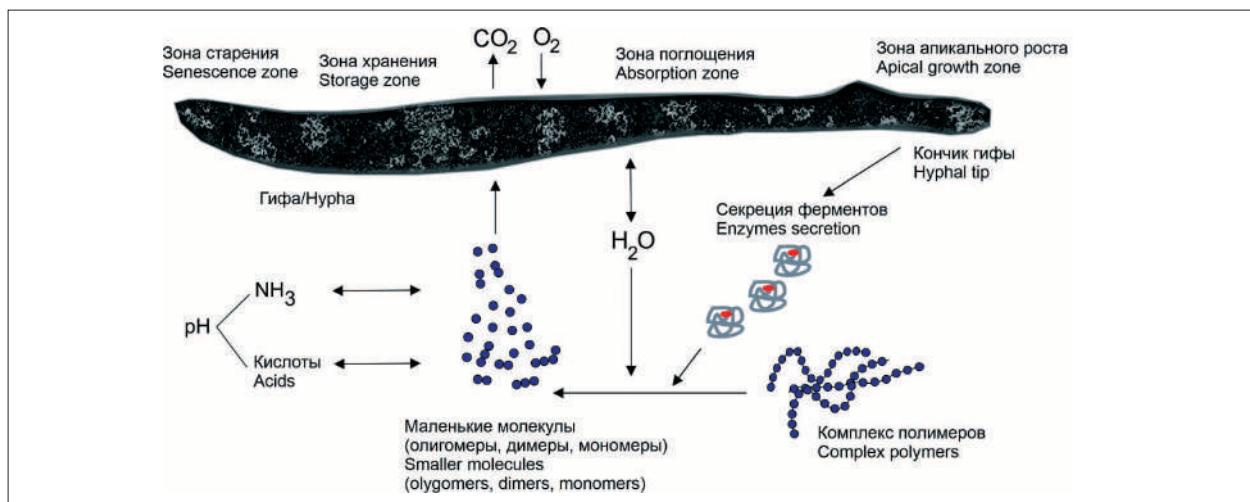


Рис. 2. Общая схема биodeградации сложных полимеров грибными гифами [22].
 Пояснения см. в тексте
 Fig. 2. General scheme of biodegradation of complex polymers by fungal hyphae [22].
 For explanations, see the text

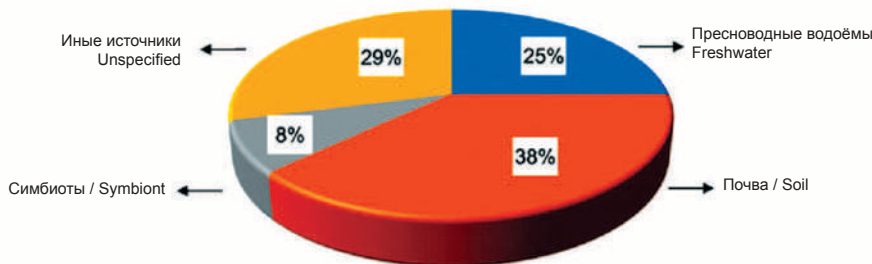


Рис. 3. Основные источники выделения актиномицетов, способных к биodeградации синтетических полимеров [91]
 Fig. 3. The main sources of isolation of actinomycete strains capable of biodegradation of synthetic polymers [91]

Загрязнение ОС в результате накопления пластиковых отходов представляет собой постоянно возрастающую экологическую угрозу для природных экосистем и здоровья населения. Пластиковые отходы отрицательно влияют на функционирование наземных экосистем, в первую очередь из-за их нежелательного накопления на свалках, вымывания в почву, увеличения выбросов парниковых газов [7]. Ещё более разрушительным является воздействие пластиковых отходов на водные экосистемы, где они негативно влияют на водные организмы [8, 9]. Работами последнего десятилетия присутствие волокнистого микропластика выявлено в воздухе снаружи и внутри помещений. Вдыхаемые фрагменты микропластика обладают биологической стойкостью и могут оказывать воздействие на здоровье из-за репродуктивной токсичности, канцерогенности и мутагенности [10, 11]. Кроме того, пластмассы на открытом воздухе могут быть источником газовых примесей (метан, этилен), связанных с изменением климата, которые, как ожидается, будут увеличиваться по мере производства и накопления большего количества пластика в ОС [12, 13]. Пластиковые отходы могут выступать в качестве переносчика органических загрязнителей, химических веществ, тяжёлых металлов и патогенов [14–17]. Кроме того, при абиотической деградации пластика выделяются высокотоксичные соединения, ухудшающие качество почвы и воды [15], а Мировой океан содержит 5,25 трлн нано-, макро- и микропластических частиц весом 269 т [18]. Это создаёт серьёзную угрозу здоровью человека, поскольку с пищей и напитками потребляется от 39 до 52 тыс. частиц микропластика ежегодно [19].

Современные методы ликвидации пластиковых отходов (сжигание, захоронение на свалках и вторичная переработка) сопряжены с огромными экономическими затратами, являются неустойчивыми и увеличивают нагрузку на ОС [3–6, 13]. В связи с этим, в последнее время большое внимание стало уделяться потенциалу биологических систем по разложению пластмасс. В обзорах последних лет показано, что некоторые микроорганизмы и их ферменты могут участвовать в процессах биodeградации пластиковых отходов [20–24]. Однако, в силу стабильности и долговечности, обусловленных их полимерной природой, большинство видов пластмасс не поддаются биodeградации, и для их полного разложения требуются столетия. Такая стойкость обусловлена высокой молекулярной

массой, прочными связями С–С и чрезвычайно гидрофобной поверхностью, трудно поддающейся воздействию ферментов. Кроме того, относительная непродолжительность присутствия пластмасс в природе препятствует появлению у микроорганизмов новых ферментов, которые могли бы разлагать синтетические полимеры [23]. Если стратегии утилизации природных полимеров микроорганизмами разрабатывались на протяжении миллиардов лет, то пластик известен всего несколько десятилетий, а это слишком короткий срок для того, чтобы естественный ход эволюции позволил микроорганизмам разработать стратегии разложения этих химических веществ. Кроме того пластмассы изначально разрабатывались таким образом, чтобы противостоять воздействию микроорганизмов, в результате чего уровень их стойкости значительно выше, чем у природных полимеров, например, целлюлозы и лигнина. Тем не менее, микробиологическое разложение – наиболее экологичный метод решения проблемы ликвидации глобального загрязнения пластиком, поэтому увеличение разнообразия микроорганизмов, разлагающих наиболее широко применяемые пластики, а также рассмотрение ферментативных механизмов, обеспечивающих эти процессы, представляет собой актуальную задачу и будет способствовать привлечению в качестве кандидатов для борьбы с пластиковыми отходами всё новых видов организмов.

Цель обзора – оценка деградационного потенциала двух групп организмов, которые в технологиях переработки и утилизации синтетических пластиков пока ещё не нашли широкого применения – базидиальных грибов и актинобактерий.

Методы. Стратегия поиска

Процесс сбора информации по теме обзора начинался с электронного поиска в базах данных PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Scopus (<http://www.scopus.com/>), Академия Google (<https://scholar.google.ru>) и в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU (<http://www.elibrary.ru>). Поиск проводили по следующим ключевым словам и словосочетаниям: «биodeградация пластика», «синтетический», «небиodeградируемый», «полимеры», «полиэтилен», «микропластик», «микроорганизмы», «актиномицеты», «мицелиальные бактерии», «базидиомицеты» «грибы», «лигнолитические ферменты», «энзимы». С помощью этой процедуры были отфильтро-

ваны публикации по микробиологическому и ферментативному разложению синтетических пластиковых полимеров. Публикации о разложении биоразлагаемых пластмасс и природных полимеров из рассмотрения были исключены. Внимание уделялось, в основном, печатным работам за последние три десятилетия, за исключением случаев, когда информация по этому вопросу приводится с исторической целью. Данные, полученные из результатов поиска, были рассмотрены, проанализированы, распределены по категориям и представлены в соответствующих разделах обзора.

Биодеградация пластиков базидиальными грибами

Грибы – эукариотические гетеротрофные организмы, вегетативное тело которых имеет мицелиальную/гифальную структуру. Сначала грибы продуцируют в ОС, содержащую трофические соединения, гидролитические ферменты, которые расщепляют сложные полимерные структуры до легко усваиваемых мономеров, а затем мономеры всасываются грибной клеткой и поступают в цитоплазму (рис. 2, см. вставку I). В результате их ассимиляции клеткой выделяются CO_2 и H_2O (минерализация субстрата в аэробных условиях). Образованные грибами мицелиальные структуры (гифы) можно разделить на четыре зоны: апикального роста, поглощения, накопления и старения, каждая из которых обладает определённой метаболической активностью в осуществлении процесса.

Базидиомицеты – высшие грибы с многоклеточным мицелием, насчитывающие около 30 тыс. видов как микроскопических размеров, так и с крупными плодовыми телами. Как все мицелиальные грибы, они играют решающую роль в разложении многочисленных сложных соединений, как природных, так и синтетических, в том числе тех, которые токсичны и загрязняют ОС [24, 25]. Базидиальные грибы обладают различными уникальными стратегиями, направленными на переработку субстрата вплоть до его полной минерализации [26]. Эти стратегии включают мощную ферментативную систему, способность к адсорбции и производству природных биосурфактантов – гидрофобин, которые позволяют грибам использовать полимеры, в том числе синтетические пластмассы, в качестве источника углерода и энергии.

Уникальной особенностью базидиомицетов является способность к синтезу экстра-

целлюлярных ферментов: лигнинпероксидаз, Mn-пероксидаз, полифункциональных пероксидаз, лакказ, обладающих широкой субстратной специфичностью, что позволяет им разлагать не только органические вещества природного происхождения, но и различные ксенобиотики, включая синтетические пластмассы. У базидиомицетов, как и других грибов, выявлены приспособительные механизмы к деградации пластиковых отходов (например, полимеров на нефтяной основе), благодаря способности осуществлять реакции различного механизма действия, сочетая при этом активность как внутриклеточных, так и внеклеточных ферментативных систем [22].

Внутриклеточная ферментативная система действует, прежде всего, как механизм внутренней детоксикации и играет важную роль в адаптации грибов [26, 27]. Деятельность этой ферментативной системы опосредуется эпоксидазами, принадлежащими к семейству цитохрома P450 (CYP) (ферменты фазы I), и трансферазами (ферменты фазы II). Ферменты фазы I и фазы II включают ферменты, участвующие в реакциях соответственно окисления и конъюгации [27]. Ферменты фазы I (CYP) представляют собой большое семейство ферментов, которые способны катализировать реакции, участвующие в метаболизме алифатических, алициклических и ароматических молекул, и ведут к эпоксилированию, гидроксигированию, деалкилированию, сульфоксидации, дезаминированию, дегалогенированию и восстановлению оксида азота [28]. Грибы обладают более разнообразными семействами ферментов CYP, чем животные, растения или бактерии. Специфичные для грибов (CYP61 и CYP56) ферменты P450 необходимы для первичного метаболизма, обеспечивая соответственно целостность стенки гиф и формирование внешней оболочки споры [29]. Моноксигеназы цитохрома P450 могут быть важны для инактивации ксенобиотиков путём введения гидроксильных групп в связи C–C. Цитохром P450s присутствует в грибах в избытке, но в основном участвует во внутриклеточном катаболизме ароматических соединений. Внеклеточная ферментативная система включает продукцию экзогидролаз, которые отвечают за разложение полисахаридов, и уникальную неспецифическую окислительную систему, участвующую в деградации таких сложных структур, как, например, лигнин [30]. Неспецифическая окислительная система может окислять широкий спектр субстратов и формируется в основном

оксидоредуктазами, включая пероксидазы, обесцвечивающие красители, и неспецифические пероксигеназы. Эти группы ферментов преобразуют органические субстраты путём окислительно-восстановительных реакций [26] и часто используются при биоремедиации, поскольку повышают растворимость загрязняющих веществ и, тем самым, снижают потенциал их биоаккумуляции. Среди прочих реакций, катализируемых неспецифическими пероксигеназами, отмечают эпоксидование, пероксигенацию ароматических веществ и сульфоксидацию [31]. Данный ферментативный комплекс характерен в основном для грибов, разлагающих древесину, таких, как ксилотрофные базидиомицеты [30].

Базидиальные грибы могут синтезировать множество внеклеточных ферментов, принимающих участие в процессе модификации и разрушения лигнина – лигниназы, которые разделяют на две группы: фенолоксидазы – лакказы и гемм-содержащие пероксидазы [32]. Эти две группы ферментов различаются акцепторами электронов: молекулярный кислород для лакказы и пероксид водорода для гемовых пероксидаз.

Характерной особенностью грибов, включая базидиальные, является секреция белков гидрофобин, которые активны на поверхности раздела сред: между клеточными стенками грибов и воздухом или между клеточными стенками грибов и твёрдыми поверхностями. Гидрофобины образуют гидрофобные поверхностные слои путём самосборки секретир-

руемых белковых мономеров в ответ на воздействие ОС [33]. Самосборка гидрофобин способствует прикреплению грибных гиф к гидрофобным поверхностям, поскольку они действуют как биосурфактанты, способствующие повышению биодоступности субстрата. Благодаря этому грибные гидрофобины рассматриваются в качестве ценного инструмента биоремедиации.

На основе гидрофобных свойств, морфологических особенностей монослоёв и растворимости в детергентах, гидрофобины делят на два класса. Гидрофобины класса I слабо растворимы в водных растворах и образуют многослойные амилоидные волокна. Гидрофобины класса II растворимы в водных растворах органических растворителей, а их монослои, из-за более простой морфологии, менее стабильны [22, 33]. Обычно каждый гриб содержит ряд различных гидрофобин. В таблице 1 суммирована информация об обнаружении гидрофобин у базидиальных грибов, участвующих в разложении пластика.

Наряду с разложением природных полимеров, в литературе встречаются данные о способности базидиальных грибов разлагать синтетические полимеры. В связи с этим методологию и знания, полученные в ходе исследований по разложению лигноцеллюлозы, в одном из недавних обзоров предложено применять и к разложению пластмасс [25]. Несмотря на то, что пластмассы существенно отличаются от лигноцеллюлозы, поскольку в них отсутствуют гидролизуемые связи С-С

Таблица 1 / Table 1

Гидрофобины базидиальных грибов, вызывающих биodeградацию пластика
Hydrophobins of basidial fungi that cause plastic biodegradation

Гриб / Fungus	Гидрофобин Hydrophobin	Класс	Молекулярный вес, кДа Molecular weight, kDa	Литературный источник Reference
<i>Agaricus bisporus</i>	ABH1	I	16	[34]
	ABH3	I	19	[35]
<i>Coprinus cinereus</i>	CoH1	I	10	[36]
<i>Dictyonema glabratum</i>	DGH2	I	14	[37]
<i>Ostreatus var. florida</i>	Fbh-1	II	12	[38]
<i>Pleurotus ostreatus</i>	POH1	I	15	[39]
	POH2	I	20	
	POH3	I	10	
<i>Pleurotus ostreatus var. florida</i>	Vmh1, Vmh2	не опр. nd	9	[40]
	Vmh3	не опр. nd	17	
<i>Tricholoma terreum</i>	Hyd 1	II	23	[41]
<i>Schizophyllum commune</i>	SC 1	I	13,5	[42, 43]

или СО и, следовательно, они обладают более высокой устойчивостью к разложению, между ними существуют очевидные сходства. Так, оба типа соединений представляют собой смеси гидрофобных полимеров с аморфными и кристаллическими участками, и для их разложения в обоих случаях требуются гидролазы и оксидоредуктазы [44]. Таким образом, из процесса разложения лигноцеллюлозы грибами можно извлечь много полезного для создания природоподобных технологий разложения и утилизации пластиков. Хотя возможность практического применения для этой цели базидиальных грибов ещё мало изучена, в литературе существуют различные примеры, когда при культивировании грибов с пластмассами наблюдали их деполимеризацию и/или биodeградацию. Признаки разрушения пластиков грибами детектировались разными методами и выражались в снижении массы полимера, различных деформациях поверхности, наблюдаемых с помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, изменении механических параметров (тензиометрия), степени кристалличности, фиксируемой методом ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием данных, снижении средней молекулярной массы полимера, определяемой с помощью газовой хроматографии/масс-спектроскопии (ГХ-МС), гель-проникающей хроматографии (ГПХ) [24].

Наиболее многочисленны примеры разложения пластиков базидиомицетами, вызывающими белую и бурую гниль древесины. У семи видов грибов белой гнили была выявлена способность к деградации ПВХ [45]. Регистрируемая по уменьшению количества С–Н-связей деполимеризация была продемонстрирована для видов *Phanerochaete chrysosporium*, *Ph. sajorcaju* и *Polyporus versicolor*; гораздо меньший потенциал деградации ПВХ отмечен для видов, принадлежащих к роду *Pleurotus*. Гриб белой гнили *Ph. chrysosporium*, разрушающий лигнин, был первым исследованным грибом, проявляющим способность к разложению фенольных смол (на фенолформальдегидном полимере) [46]. Ранее сообщалось о разрушении этим же видом другого синтетического линейного С–С полимера – поливинилового спирта – после предварительной химической обработки реактивом Фентона [47]. Согласно источнику [48], способностью к разложению поливинилового спирта, применяемого в качестве клея, обладал гриб *Pycnoporus cinnabarinus*. Авторами была показана взаимосвязь между разложением по-

лимера и продукцией грибом лакказы. Другой гриб белой гнили *Pleurotus ostreatus* разлагал пакеты из зелёного полиэтилена (LDPE) [49], в том числе предварительно обработанные плазмой [50]. Для грибов *Ph. chrysosporium* и *Trametes versicolor* была продемонстрирована способность разлагать такой полимер как нейлон (нейлон-66), широко используемый в текстильной промышленности [51]. Позднее выделение и характеристика фермента, ответственного за разложение нейлона, показали его сходство с Mn-пероксидазой [52]. Частично очищенная лигнинпероксидаза, полученная из *Ph. chrysosporium*, разлагает плёнки ПВХ [53]. К лигнолитическим грибам белой гнили относится вид *Shizophyllum commune*, известный способностью продуцировать различные ценные метаболиты, такие, как противоопухолевый полисахарид шизофиллан, и широкий спектр ферментов, включая целлюлазу, ксиланазу, пектиназу, лакказу, лигнин-пероксидазу и Mn-пероксидазу [54]. Сообщалось также о способности к деградации полиэтилена представителями этого вида, выделенными из грибных консорциумов, формирующихся при разложении древесины в сухих смешанных вечнозелёных лесах Шри-Ланки [55].

В работе [56] была показана способность базидиальных грибов разлагать остатки резиновых покрышек. В частности, установлено, что наиболее эффективным является гриб *Resinicium bicolor* (*Hydnum bicolor*). При обработке используемых в качестве добавок к резине ароматических соединений *R. bicolor* отмечали усиление роста на резине бактерий *Thiobacillus ferrooxidans*, а также ускорение процессов девулканизации. На основании полученных результатов сделано заключение о перспективности совместного культивирования базидиальных грибов и бактерий для целей биоразложения отходов резины.

Продemonстрировал более высокую, в сравнении с грибами белой гнили, способность к деполимеризации полистиролсульфоната (ПСС) гриб бурой гнили *Gloeophyllum trabeum* [57]. Углублённые исследования показали, что деполимеризация происходит под действием внеклеточного гидрохинона (2,5-диметокси-1,4-гидрохинон) Фентона. Средняя молекулярная масса сульфированного полимера под воздействием наиболее эффективного штамма-деполимеризатора снизилась в течение 20 дней на 50%, но разложение несulfированного полистирола было низким [58].

Интересным подходом к повышению биоразлагаемости синтетических материалов базидиальными грибами является включение натуральных волокон в термопластичную полимерную матрицу. Потенциал биodeградации древесно-пластиковых композитов (ДПК), полученных с использованием пластиковых отходов на основе РР и этиленвинилацетата (EVA) и древесной муки изучали в работе [59]. Мониторинг проводился путём культивирования различных видов базидиальных грибов на разных ДПК с помощью гравиметрического анализа и визуального мониторинга композитов. На основании результатов, представленных в этом исследовании, сделан вывод о наиболее эффективном взаимодействии с древесиной, содержащейся в композитах, базидиомицетов *Trametes villosa* и *Pycnoporus sanguineus*.

Грибы белой гнили *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium* и *Trametes versicolor*, а также гриб бурой гнили *Gloeophyllum trabeum* были способны к деполимеризации полистирола при совместном инкубировании с лигнином [57].

Сообщалось, что древесная щепа стимулирует выработку лакказы у гриба *Bjerkandera adusta* ТВВ-03 и вызывает ускорение биodeградации полиэтилена высокой плотности [60]. В другой работе [61] оценивали эффективность 22 изолятов грибов, обладающих способностью разрушать древесину и осуществлять ферментативную деполимеризацию полиэтилена высокого давления (ПВД). Культуры грибов инкубировали с ПВД в течение 45 дней в присутствии и в отсутствие древесины в качестве источника углерода. Поразительной особенностью эксперимента было то, что все изоляты демонстрировали более значительное разложение ПВД в отсутствие древесины, чем в её присутствии. Превзошёл другие виды грибов, в отсутствие древесины, *Phlebiopsis flavidoalba*, показавший самый высокий процент снижения массы ($23,68 \pm 0,34\%$). Авторы делают заключение, что в отсутствие предпочтительного источника углерода грибы, вызывающие гниль древесины, активно используют любой доступный источник углерода (в данном случае ПВД), демонстрируя метаболическую приспособленность грибов к выживанию в стрессовых условиях.

Ранее было установлено, что значительную деполимеризацию полиэтилена может вызывать комбинация окислительно-восстановительного медиатора НВТ и лакказы [62, 63]. В дальнейшем с помощью системы «лакказа – медиатор» была инициирована

деполимеризация ПСС. С использованием лакказы из *Trametes versicolor* показано, что ограниченная деполимеризация этого пластика происходит только в присутствии определённых окислительно-восстановительных медиаторов [57, 58].

Способность грибов к разложению пластмасс повышается в результате их обработки ультрафиолетом (УФ), гамма-стерилизации или термических воздействий с целью повысить гидрофильность поверхности. В результате таких физических обработок достигалось разложение полипропилена грибами *Bjerkandera adusta* [64] и *Coriolus versicolor* [65]. Гриб белой гнили *Ph. chrysosporium* NCIM 1170 продемонстрировал разрушающие свойства по отношению к обработанному УФ поликарбонату. При совместном инкубировании в течение одного года потеря веса поликарбоната составила 5,4%, а степень полимеризации снизилась на 40% [66].

В литературе имеются сведения о биodeградации пластиковых полимеров съедобными базидиальными грибами, образующими мясистые плодовые тела при поглощении питательных веществ из субстрата [67]. Наряду с соломой, шелухой, древесным опилом и другими растительными отходами, некоторые искусственно культивируемые виды грибов показали свою способность поглощать питательные вещества из пластиковых полимеров. Так, *Pleurotus abalones*, *Pleurotus ostreatus*, *Agaricus bisporus* путём секреции ферментов лакказ используют полиэтилен и полистирол в качестве источников углерода, демонстрируя рост за счёт разложения пластмасс [68]. Базидиомицеты *Pleurotus eryngii* и *Lentinula edodes* разлагают пластмассы ВРА (бисфенол-А) и ДЕНР (ди-2-этигексилфталат) путём секреции фермента Mn-пероксидазы. Способность разлагать зелёный полиэтилен без предварительной физической обработки наблюдали также у *Pleurotus ostreatus* [49]. Выращивание ценных видов грибов с использованием в качестве питательного субстрата пластиковых отходов – это совершенно новый подход к борьбе с пластиковым загрязнением, и продуктивность грибов можно повысить, изменив состав субстрата [69].

Таким образом, базидиальные грибы обладают хорошим потенциалом для снижения негативного загрязняющего воздействия пластика на ОС, благодаря уникальной ферментативной системе, широкому диапазону субстратной специфичности, способности вырабатывать поверхностно-активные белки

гидрофобины, позволяющие успешно колонизировать гидрофобные поверхности, и проникать через микротрещины вглубь субстрата. К настоящему времени получены данные о способности многих представителей базидиомицоты к биодеградации одного или нескольких видов пластиков, среди которых такие широко производимые во всём мире синтетические полимеры, как полиэтилен высокого и низкого давления, полистирол, полигидроксibuтират, поливинилхлорид [70]. Грибные гифы прикрепляются к пластиковой плёнке и растут на ней, используя пластик в качестве субстрата и источника питания. В результате пластиковые массы медленно деполимеризуются, и, в дальнейшем, подвергаются минерализации с образованием таких конечных продуктов, как H_2O , CO_2 , CH_4 [71].

Несмотря на доказанную принципиальную возможность применения базидиальных грибов для деградации синтетических полимеров, практического использования базидиальные грибы в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов пока ещё не нашли. Однако следует отметить, что даже если разложение грибами само по себе приводит к ограниченному разложению полимера, оно может уменьшить или вообще исключить необходимость предварительной механической (например, уменьшение размера) обработки пластмасс. Кроме того, к базидиомицотам относятся несколько коммерчески ценных искусственно культивируемых съедобных грибов [72]. Дальнейшие исследования их способности разлагать пластик позволили бы увеличить мировое производство продовольствия и сократить накопление пластика в природе [70].

Для ускорения процессов биодеградации пластиковых отходов будущие исследования в этом направлении, скорее всего, будут сосредоточены на получении новых изолятов из экосистем пластисферы – новой среды обитания, в которой могут находиться штаммы грибов, способных использовать пластиковые полимеры для роста; на привлечении для характеристики разлагающих пластик грибов молекулярных инструментов; на повышении уровня ферментативной активности грибов с помощью рекомбинантных технологий и генного редактирования.

Биодеградация пластиков актинобактериями

Актинобактерии (Actinomycetota) – уникальная группа грамположительных аэробных

прокариот с высоким содержанием GC-пар в ДНК, имеющих одну из самых сложных среди бактерий клеточную структуру. Они обладают уникальными метаболическими способностями, но, что особенно важно, представляют собой один из наиболее продуктивных источников биологически активных вторичных метаболитов [73]. Большинство практически значимых представителей актинобактерий относятся к порядку Actinomycetales и имеют тенденцию к формированию ветвящихся гиф, образующих мицелий, подобно грибному. Основные биогеоэкологические функции актиномицетов в природе сходны в значительной степени с функциями грибов [74] и заключаются в разложении в почве сложных полимеров: лигнина, целлюлозы, хитина, гумусовых веществ, что обеспечивается продукцией разнообразных экзогидролаз и способствует формированию почвенного плодородия. Актиномицеты хорошо известны своей метаболической универсальностью и многочисленными биотехнологическими применениями, такими как биоремедиация, медицина и сельское хозяйство [75, 76].

Продукция широкого спектра гидролитических ферментов является одним из основных факторов, ответственных за способность актиномицетов расти на различных пластиковых полимерах и разлагать высокомолекулярные соединения до более простых. В одном из недавних обзоров [77], посвящённых данному вопросу, суммированы сведения, касающиеся документированного участия актинобактерий в биодеградации различных видов наиболее производимых в настоящее время пластиков (табл. 2).

Актиномицеты, включая *Streptomyces* spp., *Rhodococcus ruber*, *Actinomadura* spp. и термофильные виды рода *Thermoactinomyces*, изолированные из разных экотопов, продемонстрировали, что они обладают значительным потенциалом биодеградации пластика [78, 79]. Сообщалось, что *Streptomyces scabies*, выделенный из картофеля, разлагает полиэтилен и ряд других синтетических (п-нитрофениловые эфиры) и природных (кутин и суберин) полимеров, благодаря продукции фермента эстеразы с широким диапазоном субстратной специфичности [79]. Показано также, что эндофитный актиномицет *Nocardopsis* sp., выделенный из растения гибискуса, способен разлагать полиэтилен и дизельное топливо [80]. Участие актиномицетов в экспериментальном микробном консорциуме BP8, которое эффективно разлагало полиуретан

Таблица 2 / Table 2

Деградация пластика актинобактериями [77] / Plastic degrading actinobacteria [77]

Пластик / Plastic	Актинобактерии / Actinobacteria
ПЭНП/LDPE	<i>Rhodococcus ruber</i> C208, <i>Streptomyces badius</i> ; <i>Streptomyces setonii</i> ; <i>Streptomyces viridosporus</i> , <i>Arthrobacter oxydans</i> ; <i>Arthrobacter globiformis</i> ; <i>Microbacterium paaraoxydans</i> ; <i>Cellulosimicrobium flunkei</i> ; <i>Arthrobacter paraffineus</i> , <i>Kocuria palustris</i>
ПЭВП/HDPE	<i>Arthrobacter</i> sp., <i>Arthrobacter</i> sp. GMB5, <i>Leucobacter</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp.
ПУР/PUR	<i>Rhodococcus equi</i> , <i>Corynebacterium</i> sp. AF14; <i>Arthrobacter globiformis</i> SBI-5
ПЭ/PE	<i>Micrococcus luteus</i> , <i>Brevibacterium</i> sp., <i>Streptomyces albogriseolus</i> LBX-27
ПС/PS	<i>Rhodococcus ruber</i> C208, <i>Mycobacterium</i> sp., <i>Aquihabitans</i> sp., <i>Paenibacillus urinalis</i>
ПП/PP	<i>Rhodococcus ruber</i> C208
ПЭТ/PET	<i>Streptomyces</i> sp.; <i>Brevibacterium</i> sp.
ПВХ/PVC	<i>Micrococcus</i> sp. PVC-4

Таблица 3 / Table 3

Деградация различных видов пластиков стрептомицетами [91]
Various types of plastics degradation by *Streptomyces* spp. [91]

Полимер / Polymer	Вид / Species
Полиэтилен / Polyethylene	<i>Streptomyces aburaviensis</i> , <i>S. aveblanens</i> , <i>S. iakyrus</i> , <i>S. misioensis</i> , <i>S. warraensis</i> , <i>S. humidus</i> , <i>S. nigellus</i> , <i>S. parvullus</i> , <i>S. longisporoflavus</i> , <i>S. albogriseolus</i> LBX-2, <i>S. badius</i> ATCC39117, <i>S. setonii</i> ATCC 39116, <i>S. viridosporus</i> ATCC 39115
Полиэтилен низкой плотности Low-Density Polyethylene	<i>Streptomyces fulvissimus</i> , <i>S. badius</i> ATCC 39117, <i>S. setonii</i> ATCC 39116, <i>S. viridosporus</i> ATCC 39115
Полиэтилен высокой плотности High-Density Polyethylene	<i>Streptomyces</i> spp.
Смесь полиэтилена с крахмалом Starch-Polyethylene	<i>S. badius</i> 252, <i>S. setonii</i> 75Vi2, <i>S. viridosporus</i> T7A
Полиэтилентерефталат Polyethyleneterephthalate	<i>Streptomyces</i> spp.
Поли(цис-1,4-изопрен) Poly(cis-1,4-isoprene)	<i>S. griseoplanus</i> AS 4.1868T, <i>S. coelicolor</i> 1A, <i>S. exfoliatus</i> K10, <i>S. griseus</i> 1D, <i>S. lividans</i> 1326
Полиэстер / Polyester	<i>S. antibioticus</i>

с различными химическими добавками, было отмечено в работе [81].

В литературе часто встречаются свидетельства значительного вклада актинобактерий в разложение ПЭТ [82], который в основном используется для производства ПЭТ-бутылок, ПЭТ-фольги и волокон в текстильной промышленности. Способность к разложению ПЭТ ограничена, по-видимому, несколькими бактериальными таксонами, и наиболее охарактеризована у представителей родов *Thermomonospora* [83, 84], *Thermobifida* [85] и *Saccharomonospora* [86].

К настоящему времени известны четыре участвующие в разложении ПЭТ фермента (полиэфиргидролазы), продуцируемые видами рода *Thermobifida*, и по одному ферменту – представителями родов *Saccharomonospora* и *Thermomonospora*. Ферменты этих актино-

бактерий являются Ca²⁺-зависимыми, что обеспечивает им термостабильность, и они частично ингибируются выделяющимися при гидролизе продуктами [87]. Один из подходов к преодолению этого ограничения заключается в сочетании действия полиэфиргидролаз с другими ферментами для улучшения их каталитических свойств и связывания субстрата [88].

Известно, что актиномицеты продуцируют внеклеточные полимеры, такие как декстран, гликоген, леван и полисахаридные слизи, обогащённые азотом [89]. Было показано, что образование актиномицетами биоплёнки, подобно биоплёнкам клеточных бактерий, также является важным фактором колонизации пластмасс мицелиальными прокариотами [90].

Различные синтетические полимеры были изучены на предмет их биодеградаций штаммами наиболее распространённого

в различных местообитаниях рода *Streptomyces*. Имеющиеся в литературе сведения о деградиционном потенциале стрептомицетов представлены в таблице 3.

Способностью утилизировать в качестве единственного источника углерода поли-(3-гидроксибутират) (PHB) и его сополимер поли-(3-гидроксибутират-со-3-гидроксивалерат) (PHBV) характеризовался морской изолят *Streptomyces* sp. SNG9 [92]. О бактериальном гидролизе полимеров свидетельствовали морфологические изменения слоёв, наблюдаемые с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). В присутствии простых растворимых источников углерода экспрессия PHB-деполимеразы у стрептомицета была подавлена.

Поли-(3-гидроксибутират-со-3-гидроксивалерат) обладает свойствами, аналогичными термопластам, получаемым на нефтехимической основе. Для биodeградации PHBV в работе [93] провели исследования с *Actinomadura* sp. AF-555 и достигли воспроизводимых результатов разложения пластика, определённых с помощью SEM (шероховатость и ямки на поверхности) и методом ИК-спектromетрии с Фурье-преобразованием данных: по расщеплению связей –C–H и O–R групп или сложного эфира (>C=O).

Термофильное компостирование было одной из успешных технологий переработки биоразлагаемых пластмасс [94], в связи с чем поиск перспективных деструкторов среди термофильных актиномицетов продолжается. Сообщалось о разрушении термофильными представителями родов *Actinomadura* и *Saccharomonospora* сложных полиэфиrow поли(этиленсукцината) (PES), поли(ε-капролактона) (PCL) и поли(β-гидроксибутирата) (PHB) [95]. Среди термофильных PHB-, PCL- и PES-деструкторов были идентифицированы также представители родов *Microbispora*, *Streptomyces* и *Thermoactinomyces*, разлагающие полиэфиры при температуре 50 °C.

Гидролиз полиэфиrow с высокой молярной массой катализируют кутиназы (ЕС 3.1.1.74) – подкласс ферментов эстераз. Кутиназы представляют собой αβ-гидролазы или гидролазы сложных эфиrow карбоксильных соединений, первоначально выделенные из фитопатогенных грибов, поскольку они могут разрушать кутин в листьях или суберин в коре растений [96]. В дальнейшем полиэстеразу, способную гидролизовать ароматические полиэфиры (в первую очередь ПЭТ), выделили из

Thermobifida fusca [97] и ряда термофильных актиномицетов: *Thermomonospora fusca* [98], *Thermobifida alba* [99], *Thermobifida cellulolytica* [82] и *Thermomonospora curvata* [100]. Сообщалось также, что кутиназы гидролизуют алифатические полиэфиры, например, поли(ε-капролактона) PCL [101], а также алифатические ароматические сополиэфиры, такие как ПЭТ [102] и политриметилен терефталат (РТТ) [103].

Важным аспектом поиска среди актиномицетов штаммов с высокой деградиционной способностью является разнообразие источников выделения. Основным источником изолятов мицелиальных бактерий, способных разлагать синтетические полимеры, является почва (38%), в первую очередь, загрязнённая почва свалок или промышленных предприятий (рис. 3, см. цв. вкладку I).

Под воздействием разнообразных загрязняющих веществ в такой почве создаются условия, способствующие развитию микроорганизмов, способных разрушать полимеры, и часто эти полимеры используются ими в качестве единственного источника углерода [91]. Разлагать синтетические полимеры могут также штаммы, выделенные из незагрязнённых источников – почвы и пресноводных водоёмов (25%) [95], а также симбиотические штаммы (8%), ассоциированные, например, с дождевыми червями [104]. Среди иных источников изоляции перспективных культур (29%) большие надежды исследователей связаны с изучением морской среды, поскольку пластиковый мусор является основным источником загрязнения морских экосистем [105], и деградиционный потенциал морских актинобактерий в этих средах оценивается как весьма высокий [91].

Исследования, посвящённые биodeградации пластика актинобактериями, были до сих пор сосредоточены на понимании и моделировании процесса биodeградации полимеров (в основном, полиэтиленоподобных) отдельными штаммами. Эти кинетические модели прогнозируют скорость биodeградации конкретных пластиков выбранными штаммами и демонстрируют возможные пределы корректировки процесса. В дальнейшем, очевидно, фокус исследований будет смещён в сторону выяснения метаболических путей деградации, идентификации ферментов и генов, которые отвечают у конкретных видов за разложение всё более широкого спектра полимеров. Эти перспективные направления исследований будут способствовать разработке новых спосо-

бов обращения с пластиковыми отходами, что позволит в более крупных масштабах решать проблему загрязнения, связанную с накоплением в ОС синтетических полимеров.

Заключение

В целом, анализ современной литературы позволяет заключить, что биологический контроль пластикового загрязнения с использованием базидиальных грибов и актинобактерий представляет собой перспективный и экологичный способ борьбы с ним. Обе группы организмов могут участвовать в процессах разложения, благодаря мощной ферментативной системе и развитому мицелию, способному проникать в микротрещины пластика. Однако, несмотря на продемонстрированную возможность применения представителей этих групп мицелиальных организмов для деградации синтетических полимеров, практического использования в технологиях переработки и утилизации пластиковых отходов ни базидиомицеты, ни актиномицеты пока еще не нашли. Учитывая, что далеко не все экологические ниши были исследованы на предмет присутствия в них способных к разложению пластиков мицелиальных деструкторов, возможно, что расширение спектра исследуемых местообитаний приведёт к выделению новых целевых штаммов.

Расширить наши представления о механизмах биодegradации и роли различных участвующих в ней представителей микробиоты позволит использование метагеномики, которая даёт возможность поиска микроорганизмов, обладающих потенциалом биодegradации пластмасс как среди культивируемых, так и некультивируемых видов. Кроме того, инструменты молекулярной биологии, включая транскриптомику, протеомику и метаболомику, помогут понять самые глубокие аспекты взаимодействий, происходящих под влиянием факторов окружающей среды между генами, транскриптами, белками и метаболитами микроорганизмов в процессе разложения синтетических пластмасс.

Очевидно, перспективным подходом к повышению эффективности разложения пластмасс может явиться использование синергизма, возникающего в консорциуме различных видов, как между организмами, так и их ферментами. Несмотря на то, что многие ферменты, разлагающие пластик, были идентифицированы, биохимические и структурные свойства этих ферментов изучены пока

недостаточно. Эта информация необходима для лучшего понимания механизмов, участвующих в разложении слабо деградируемых пластиков. Она будет полезной в рамках синтетической биологии (для модификации продуцентов ферментов), а также при разработке новых пластиковых полимеров с улучшенной способностью к биологическому разложению. Дальнейшие исследования в этой области послужат основой для создания биотехнологии переработки пластиковых отходов, что позволит приблизиться к решению комплекса экологических проблем, связанных с пластиковым загрязнением.

Работа выполнена в рамках 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. Bijker W.E. The social construction of Bakelite: Toward a theory of invention // The Social construction of technological systems / Eds. W.E. Bijker, T.P. Hughes, T. Pinch. Cambridge, MA: MIT Press, 1987. P. 159–187.
2. Morgana S., Casentini B., Amalfitano S. Uncovering the release of micro/nanoplastics from disposable face masks at times of COVID-19 // J. Hazard. Mater. 2021. V. 419. Article No. 126507. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126507
3. Plastics – the facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data // Plastics Europe [Internet recourse] <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019> (Accessed: 30.03.2024).
4. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal // Palgrave Commun. 2019. V. 5. Article No. 6. doi: 10.1057/s41599-018-0212-7
5. Barra R., Leonard S.A., Whaley C., Bierbaum R. Plastics and the circular economy. A STAP document. Washington: Scientific and Technical Advisory Panel, 2018. 28 p. doi: 10.13140/RG.2.2.11515.57128
6. The future of plastic // Nature communications. 2018. V. 9. Article No. 2157. doi: 10.1038/s41467-018-04565-2
7. Arun D., Kannabiran K. Plastic associated environmental pollution: A systematic review on biodegradation methods, challenges and future prospects // Res. J. Chem. Environ. 2023. V. 27. No. 2. P. 122–134. doi: 10.25303/2702rjce1220134
8. Gallo F., Fossi C., Weber R., Santillo D., Sousa J., Ingram I., Nadal A., Romano D. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures // Environ. Sci. Eur. 2018. V. 30. No. 1. Article No. 13. doi: 10.1186/s12302-018-0139-z

9. Ganesh Kumar A., Anjana K., Hinduja M., Sujitha K., Dharani G. Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. V. 150. Article No. 110733. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110733
10. Gasperi J., Wright S.L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Kelly F.J., Tassin B. Microplastics in air: are we breathing it in? // *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 2018. V. 1. P. 1–5. doi: 10.1016/j.coesh.2017.10.002
11. Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G., Jiménez P.D., Simonneau A., Binet S., Galop D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment // *Nat. Geosci.* 2019. V. 12. No. 5. P. 339–344. doi: 10.1038/s41561-019-0335-5
12. Royer S.J., Ferrón S., Wilson S.T., Karl D.M. Production of methane and ethylene from plastic in the environment // *PloS One.* 2018. V. 13. No. 8. P. e0200574. doi: 10.1371/journal.pone.0200574
13. Ali S.S., Elsamahy T., Koutra E., Kornaros M., El-Sheekh M., Abdelkarim E.A., Zhu D., Sun J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 771. Article No. 144719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144719
14. Galloway T.S., Lewis C.N. Marine microplastics spell big problems for future generations // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. V. 113. No. 9. P. 2331–2333. doi: 10.1073/pnas.1600715113
15. Chen Q., Allgeier A., Yin D., Hollert H. Leaching of endocrine disrupting chemicals from marine microplastics and mesoplastics under common life stress conditions // *Environ. Int.* 2019. V. 130. Article No. 104938. doi: 10.1016/j.envint.2019.104938
16. Chamas A., Moon H., Zheng J., Qiu Y., Tabassum T., Jang J.H., Abu-Omar M., Scott S.L., Suh S. Degradation rates of plastics in the environment // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020. V. 8. No. 9. P. 3494–3511. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b06635?ref
17. Tang Y., Liu Y., Chen Y., Zhang W., Zhao J., He S., Yang C., Zhang T., Tang C., Zhang C., Yang Z. A review: Research progress on microplastic pollutants in aquatic environments // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 766. Article No. 142572. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142572
18. Eriksen M., Lebreton L.C., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borerro J.C., Galgani F., Ryan P.G., Reisser J. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea // *PloS One.* 2014. V. 9. No. 12. P. e111913. doi: 10.1371/journal.pone.0111913
19. Schmaltz E., Melvin E.C., Diana Z., Gunady E.F., Rittschof D., Somarelli J.A., Virdin J., Dunphy-Daly M.M. Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution // *Environ. Int.* 2020. V. 144. Article No. 106067. doi: 10.1016/j.envint.2020.106067
20. Ho B.T., Roberts T.K., Lucas S. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene: the microbial approach // *Crit. Rev. Biotechnol.* 2018. V. 38. No. 2. P. 308–320. doi: 10.1080/07388551.2017.1355293
21. Iram D., Riaz R., Iqbal R.K. Usage of potential microorganisms for degradation of plastics // *Open J. Environ. Biol.* 2019. V. 4. No. 1. P. 7–15. doi: 10.17352/ojeb.000010
22. Sánchez C. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation // *Biotechnol. Adv.* 2020. V. 40. Article No. 107501. doi: 10.1016/j.biotechadv.2019.107501
23. Amobonye A., Bhagwat P., Singh S., Pillai S. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 759. Article No. 143536. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143536
24. Kotova I.B., Taktarova Yu.V., Tsavkelova E.A., Egorova M.A., Bubnov I.A., Malakhova D.V., Shirinkina L.I., Sokolova T.G., Bonch-Osmolovskaya E.A. Microbial degradation of plastics and approaches to make it more efficient // *Microbiology.* 2021. V. 90. No. 6. P. 671–701. doi: 10.1134/S0026261721060084
25. 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
26. Olicón-Hernández D.R., González-López J., Aranda E. Overview on the biochemical potential of filamentous fungi to degrade pharmaceutical compounds // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8. Article No. 256025. doi: 10.3389/fmicb.2017.01792
27. Schwartz M., Perrot T., Aubert E., Dumarçay S., Favier F., Gérardin P., Morel-Rouhier M., Mulliert G., Saiag F., Didierjean C., Gelhaye E. Molecular recognition of wood polyphenols by phase II detoxification enzymes of the white rot *Trametes versicolor* // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. No. 1. Article No. 8472. doi: 10.1038/s41598-018-26601-3
28. Shin J., Kim J.E., Lee Y.W., Son H. Fungal cytochrome P450s and the P450 complement (CYPome) of *Fusarium graminearum* // *Toxins (Basel).* 2018. V. 10. No. 3. Article No. 112. doi: 10.3390/toxins10030112
29. Črešnar B., Petrič Š. Cytochrome P450 enzymes in the fungal kingdom // *Biochim. Biophys. Acta, Proteins Proteomics.* 2011. V. 1814. No. 1. P. 29–35. doi: 10.1016/j.bbapap.2010.06.020
30. Sánchez C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi // *Biotechnol. Adv.* 2009. V. 27. No. 2. P. 185–194. doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.001
31. Karich A., Ullrich R., Scheibner K., Hofrichter M. Fungal unspecific peroxygenases oxidize the majority of organic EPA priority pollutants // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8. Article No. 1463. doi: 10.3389/fmicb.2017.01463
32. Kulikova N.A., Klein O.I., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Use of basidiomycetes in industrial waste process-

ing and utilization technologies: Fundamental and applied aspects (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2011. V. 47. P. 565–579. doi: 10.1134/S000368381106007X

33. Wu Y., Li J., Yang H., Shin H.J. Fungal and mushroom hydrophobins: A review // J. Mushroom. 2017. V. 15. No. 1. P. 1–7. doi: 10.14480/JM.2017.15.1.1

34. Lugones L.G., Bosscher J.S., Scholtmeyer K., de Vries O.M.H., Wessels J.G.H. An abundant hydrophobin (ABH1) forms hydrophobic rodlet layers in *Agaricus bisporus* fruiting bodies // Microbiol. 1996. V. 142. No. 5. P. 1321–1329. doi: 10.1099/13500872-142-5-1321

35. Lugones L.G., Wös H.A.B., Wessels J.G.H. A hydrophobin (ABH3) specifically secreted by vegetatively growing hyphae of *Agaricus bisporus* (common white button mushroom) // Microbiol. 1998. V. 144. No. 8. P. 2345–2353. doi: 10.1099/00221287-144-8-2345

36. Ásgeirsdóttir S.A., Halsall J.R., Casselton L.A. Expression of two closely linked hydrophobin genes of *Coprinus cinereus* is monokaryon-specific and down-regulated by the oid-1 mutation // Fungal Genet. Biol. 1997. V. 22. No. 1. P. 54–63. doi: 10.1006/fgbi.1997.0992

37. Trembley M.L., Ringli C., Honegger R. Differential expression of hydrophobins DGH1, DGH2 and DGH3 and immunolocalization of DGH1 in strata of the lichenized basidiocarp of *Dictyonema glabratum* // New Phytol. 2002. V. 154. No. 1. P. 185–195. doi: 10.1046/j.1469-8137.2002.00360.x

38. Peñas M.M., Ásgeirsdóttir S.A., Lasa I., Culiñez-Maciá F.A., Pisabarro A.G., Wessels J.G., Ramírez L. Identification, characterization, and in situ detection of a fruit-body-specific hydrophobin of *Pleurotus ostreatus* // Appl. Environ. Microbiol. 1998. V. 64. No. 10. P. 4028–4034. doi: 10.1128/AEM.64.10.4028-4034.1998

39. Ásgeirsdóttir S.A., de Vries O.M.H., Wessels J.G.H. Identification of three differentially expressed hydrophobins in *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) // Microbiol. 1998. V. 144. No. 11. P. 2961–2969. doi: 10.1099/00221287-144-11-2961

40. Elias A., Barona A., Arreguy A., Rios J., Aranguiz I., Peñas J. Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis // Process Biochem. 2002. V. 37. No. 8. P. 813–820. doi: 10.1016/S0032-9592(01)00287-4

41. Mankel A., Krause K., Kothe E. Identification of a hydrophobin gene that is developmentally regulated in the ectomycorrhizal fungus *Tricholoma terreum* // Appl. Environ. Microbiol. 2002. V. 68. No. 3. P. 1408–1413. doi: 10.1128/AEM.68.3.1408-1413.2002

42. Schuren F.H.J., Wessels J.G.H. Two genes specifically expressed in fruiting dikaryons of *Schizophyllum commune*: homologies with a gene not regulated by mating-type genes // Gene. 1990. V. 90. No. 2. P. 199–205. doi: 10.1016/0378-1119(90)90180-y

43. Wösten H.A.B., Wessels J.G.H. Hydrophobins, from molecular structure to multiple functions in fungal development // Mycoscience. 1997. V. 38. P. 363–374. doi: 10.1007/BF02464099

44. Daly P., Cai F., Kubicek C.P., Jiang S., Grujic M., Rahimi M.J., Sheteiyw 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

45. Kırbaş Z., Keskin N., Güner A. Biodegradation of polyvinylchloride (PVC) by white rot fungi // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1999. V. 63. No. 3. P. 335–342. doi: 10.1007/s001289900985

46. Gusse A.C., Miller P.D., Volk T.J. White-rot fungi demonstrate first biodegradation of phenolic resin // Environ. Sci. Technol. 2006. V. 40. No. 13. P. 4196–4199. doi: 10.1021/es060408h

47. Huang M.H., Shih Y.P., Liu S.M. Biodegradation of polyvinyl alcohol by *Phanerochaete chrysosporium* after pretreatment with Fenton's reagent // J. Environ. Sci. Health. A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng. 2002. V. 37. No. 1. P. 29–41. doi: 10.1081/Ese100108480

48. Larking D.M., Crawford R.J., Christie G.B., Lonergan G.T. Enhanced degradation of polyvinyl alcohol by *Pycnoporus cinnabarinus* after pretreatment with Fenton's reagent // Appl. Environ. Microbiol. 1999. V. 65. No. 4. P. 1798–1800. doi: 10.1128/AEM.65.4.1798-1800.1999

49. da Luz J.M.R., Paes S.A., Ribeiro K.V.G., Mendes I.R., Kasuya M.C.M. Degradation of green polyethylene by *Pleurotus ostreatus* // PLoS One. 2015. V. 10. No. 6. Article No. e0126047. doi: 10.1371/journal.pone.0126047

50. Gómez-Méndez L.D., Moreno-Bayona D.A., Poutou-Piñales R.A., Salcedo-Reyes J.C., Pedroza-Rodríguez A.M., Vargas A., Bogoya J.M. Biodeterioration of plasma pretreated LDPE sheets by *Pleurotus ostreatus* // PLoS One. 2018. V. 13. No. 9. Article No. e0203786. doi: 10.1371/journal.pone.0203786

51. Miura M., Deguchi T., Yanagi C., Suzuki J., Kitaoka Y., Kakezawa M. The indicative culture parameters of manganese peroxidase production by white rot fungus IZU-154 // J. Ferment. Bioeng. 1997. V. 84. No. 5. P. 414–420. doi: 10.1016/S0922-338X(97)82001-6

52. Deguchi T., Matsubara M., Nishida T. NADH oxidation by manganese peroxidase with or without alpha-hydroxy acid // Biosci. Biotechnol. Biochem. 2002. V. 66. No. 4. P. 717–721. doi: 10.1271/bbb.66.717

53. Khatoun N., Jamal A., Ali M.I. Lignin peroxidase isoenzyme: a novel approach to biodegrade the toxic synthetic polymer waste // Environ. Technol. 2019. V. 40. No. 11. P. 1366–1375. doi: 10.1080/09593330.2017.1422550

54. 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

55. Perera P., Deraniyagala A.S., Mahawaththagea M.P.S., Herath H., Rajapakse C.S.K., Wijesinghe P., Attanayake R.N. Decaying hardwood associated fungi showing signatures of polyethylene degradation // BioResources. 2021. V. 16. No. 4. P. 7056–7070. doi: 10.15376/biores.16.4.7056-7070

56. Bredberg K., Andersson B.E., Landfors E., Holst O. Microbial detoxification of waste rubber material by wood-rotting fungi // *Bioresour. Technol.* 2002. V. 83. No. 3. P. 221–224. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00218-8
57. 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
58. Krueger M.C., Seiwert B., Prager A., Zhang S., Abel B., Harms H., Schlosser D. Degradation of polystyrene and selected analogues by biological Fenton chemistry approaches: Opportunities and limitations // *Chemosphere*. 2017. V. 173. P. 520–528. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.089
59. Catto A.L., Rosseto E.S., Reck M.A., Rossini K., da Silveira R.M.B., Santana R.M.C. Growth of white rot fungi in composites produced from urban plastic waste and wood // *Macromol. Symp.* 2014. V. 344. No. 1. P. 33–38. doi: 10.1002/masy.201300216
60. Kang B.R., Kim S.B., Song H.A., Lee T.K. Accelerating the biodegradation of high-density polyethylene (HDPE) using *Bjerkandera adusta* TBB-03 and lignocellulose substrates // *Microorganisms*. 2019. V. 7. No. 9. Article No. 304. doi: 10.3390/microorganisms7090304
61. Perera P., Herath H., Paranagama P.A., Wijesinghe P., Attanayake R.N. Wood decay fungi show enhanced biodeterioration of low-density polyethylene in the absence of wood in culture media // *Plos One*. 2023. V. 18. No. 7. Article No. e0288133. doi: 10.1371/journal.pone.0288133
62. Fujisawa M., Hirai H., Nishida T. Degradation of polyethylene and Nylon-66 by the laccase-mediator system // *J. Polym. Environ.* 2001. V. 9. No. 3. P. 103–108. doi: 10.1023/A:1020472426516
63. Giardina P., Faraco V., Pezzella C., Piscitelli A., Vanhulle S., Sannia G. Laccases: a never-ending story // *Cell. Mol. Life Sci.* 2010. V. 67. No. 3. P. 369–385. doi: 10.1007/s00018-009-0169-1
64. Butnaru E., Darie-Niță R.N., Zaharescu T., Balaș T., Tănase C., Hitruc G., Doroftei F., Vasile C. Gamma irradiation assisted fungal degradation of the polypropylene/biomass composites // *Radiat. Phys. Chem.* 2016. No. 125. P. 134–144. doi: 10.1016/j.radphyschem.2016.04.003
65. Kord B., Ayrilmis N., Ghalehno M.D. Effect of fungal degradation on technological properties of carbon nanotubes reinforced polypropylene/rice straw composites // *Polym. Polym. Compos.* 2021. V. 29. No. 5. P. 303–310. doi: 10.1177/0967391120915347
66. Artham T., Doble M. Biodegradation of physicochemically treated polycarbonate by fungi // *Biomacromolecules*. 2010. V. 11. No. 1. P. 20–28. doi: 10.1021/bm9008099
67. 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
68. Hock O.G., Lum H.W., de Qin D., Kee W.K., Shing W.L. The growth and laccase activity of edible mushrooms involved in plastics degradation // *Curr. Topics Toxicol.* 2019. V. 15. P. 57–62.
69. da Luz J.M.R., Paes S.A., Nunes M.D., da Silva Md.C.S., Kasuya M.C.M. Degradation of oxo-biodegradable plastic by *Pleurotus ostreatus* // *Plos One*. 2013. V. 8. No. 8. Article No. e69386. doi: 10.1371/journal.pone.0069386
70. Ekanayaka A.H., Tibpromma S., Dai D., Xu R., Suwannarach N., Stephenson S.L., Dao C., Karunaratna S.C. A review of the fungi that degrade plastic // *J. Fungi (Bazel)*. 2022. V. 8. No. 8. Article No. 772. doi: 10.3390/jof8080772
71. Montazer Z., Habibi Najafi M.B., Levin D.B. Microbial degradation of low-density polyethylene and synthesis of polyhydroxyalkanoate polymers // *Can. J. Microbiol.* 2019. V. 65. No. 3. P. 224–234. doi: 10.1139/cjm-2018-0335
72. de Mattos-Shiple K.M.J., Ford K.L., Alberti F., Banks A.M., Bailey A.M., Foster G.D. The good, the bad and the tasty: the many roles of mushrooms // *Stud. Mycol.* 2016. V. 85. No. 1. P. 125–157. doi: 10.1016/j.simyco.2016.11.002
73. Biology and biotechnology of actinobacteria / Eds. J. Wink, F. Mohammadipanah, J. Hamedi. Cham: Springer, 2017. Chapter VII. P. 151–180. doi: 10.1007/978-3-319-60339-1
74. Dobrovol'skaya T.G., Zvyagintsev D.G., Chernov I.Yu., Golovchenko A.V., Zenova G.M., Lysak L.V., Manucharova N.A., Marfenina O.E., Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Umarov M.M. The role of microorganisms in the ecological functions of soils // *Eurasian Soil Sci.* 2015. V. 48. P. 959–967. doi: 10.1134/S1064229315090033
75. Gohain A., Manpoong C., Saikia R., De Mandal S. Actinobacteria: diversity and biotechnological applications // *Recent Advancements in Microbial Diversity* / Eds. S. De Mandal, P. Bhatt. Academic Press, 2020. P. 217–231. doi: 10.1016/B978-0-12-821265-3.00009-8
76. Grigoryan L.N., Bataeva Yu.V. Ecological features and biotechnological possibilities of soil actinobacteria (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 6–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-006-019
77. Arun D., Kannabiran K. Plastic associated environmental pollution: A systematic review on biodegradation methods, challenges and future prospects // *Res. J. Chem. Environ.* 2023. V. 27. No. 2. P. 122–134. doi: 10.25303/2702rjce1220134
78. Auta H.S., Emenike C.U., Jayanthi B., Fauziah S.H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated

from mangrove sediment // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 127. P. 15–21. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.036

79. Jabloun R., Khalil M., Moussa I.E.B., Simao-Beauvoir A.M., Lerat S., Brzezinski R., Beaulieu C. Enzymatic degradation of p-nitrophenyl esters, polyethylene terephthalate, cutin, and suberin by Sub1, a suberinase encoded by the plant pathogen *Streptomyces scabies* // Microbes Environ. 2020. V. 35. No. 1. Article No. ME19086. doi: 10.1264/j sme2.ME19086

80. Singh M.J., Sedhuraman P. Biosurfactant, polythene, plastic, and diesel biodegradation activity of endophytic *Nocardopsis* sp. mrinalini9 isolated from *Hibiscus rosasinensis* leaves // Bioresour. Bioprocess. 2015. V. 2. Article No. 2. doi: 10.1186/s40643-014-0034-4

81. Gaytán I., Sánchez-Reyes A., Burelo M., Vargas-Suárez M., Liachko I., Press M., Sullivan S., Cruz-Gómez M.J., Loza-Tavera H. Degradation of recalcitrant polyurethane and xenobiotic additives by a selected landfill microbial community and its biodegradative potential revealed by proximity ligation-based metagenomic analysis // Front. Microbiol. 2020. V. 10. Article No. 2986. doi: 10.3389/fmicb.2019.02986

82. Herrero Acero E., Ribitsch D., Steinkellner G., Gruber K., Greimel K., Eiteljoerg I., Trotscha E., Wei R., Zimmermann W., Zinn M., Cavaco-Paulo A., Freddi G., Schwab H., Guebitz G. Enzymatic surface hydrolysis of PET: effect of structural diversity on kinetic properties of cutinases from *Thermobifida* // Macromolecules. 2011. V. 44. No. 12. P. 4632–4640. doi: 10.1021/ma200949p

83. Kleeberg I., Hetz C., Kroppenstedt R.M., Müller R.J., Deckwer W.D. Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters by *Thermomonospora fusca* and other thermophilic compost isolates // Appl. Environ. Microbiol. 1998. V. 64. No. 5. P. 1731–1735. doi: 10.1128/AEM.64.5.1731-1735.1998

84. Wei R., Oeser T., Then J., Kühn N., Barth M., Schmidt J., Zimmermann W. Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester-degrading hydrolases from *Thermomonospora curvata* // AMB Express. 2014. V. 4. Article No. 44. doi: 10.1186/s13568-014-0044-9

85. Ribitsch D., Herero Acero E., Greimel K., Dellacher A., Zitzenbacher S., Marold A., Rodriguez R.D., Steinkellner G., Gruber K., Schwab H., Guebitz G.M. A new esterase from *Thermobifida halotolerans* hydrolyses polyethylene terephthalate (PET) and polylactic acid (PLA) // Polymers. 2012. V. 4. P. 617–629. doi: 10.3390/polym4010617

86. Kawai F., Oda M., Tamashiro T., Waku T., Tanaka N., Yamamoto M., Mizushima H., Miyakawa T., Tanokura M. A novel Ca²⁺-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190 // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2014. V. 98. No. 24. P. 10053–10064. doi: 10.1007/s00253-014-5860-y

87. Barth M., Oeser T., Wei R., Then J., Schmidt J., Zimmermann W. Effect of hydrolysis products on the

enzymatic degradation of polyethylene terephthalate nanoparticles by a polyester hydrolase from *Thermobifida fusca* // Biochem. Eng. J. 2015. V. 93. P. 222–228. doi: 10.1016/j.bej.2014.10.012

88. Austin H.P., Allen M.D., Donohoe B.S., Rorrer N.A., Kearns F.L., Silveira R.L., Pollard B.C., Dominick G., Duman R., El Omari K., Mykhaylyk V., Wagner A., Michener W.E., Amore A., Skaf M.S., Crowley M.F., Thorne A.W., Johnson C.W., Woodcock H.L., McGeehan J.E., Beckham G.T. Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. V. 115. No. 19. P. E4350–E4357. doi: 10.1073/pnas.1718804115

89. Pujic P., Beaman B.L., Ravalison M., Boiron P., Rodriguez-Nava V. Nocardia and Actinomyces // Molecular Medical Microbiology / Eds. Y. Tang, A. Sails. Academic Press, 2015. V. 2. P. 731–752. doi: 10.1016/B978-0-12-397169-2.00040-8

90. Gilan I., Sivan A. Effect of proteases on biofilm formation of the plastic-degrading actinomycete *Rhodococcus ruber* C208 // FEMS Microbiol. Lett. V. 342. No. 1. P. 18–23. doi: 10.1111/1574-6968.12114

91. Rodríguez-Fonseca M.F., Sánchez-Suárez J., Valero M.F., Ruiz-Balaguera S., Díaz L.E. *Streptomyces* as potential synthetic polymer degraders: a systematic review // Bioengineering (Bazel). 2021. V. 8. No. 11. Article No. 154. doi: 10.3390/bioengineering8110154

92. Mabrouk M.M., Sabry S.A. Degradation of poly (3-hydroxybutyrate) and its copolymer poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by a marine *Streptomyces* sp. SNG9 // Microbiol. Res. 2001. V. 156. No. 4. P. 323–335. doi: 10.1078/0944-5013-00115

93. Shah A.A., Hasan F., Hameed A. Degradation of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by a newly isolated *Actinomadura* sp. AF-555, from soil // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2010. V. 64. No. 4. P. 281–285. doi: 10.1016/j.ibiod.2009.10.012

94. Tokiwa Y., Iwamoto A., Koyama M., Kataoka N., Nishida H. Biological recycling of plastics containing ester bonds // Makromol. Chem. Macromol. Symp. 1992. V. 57. No. 1. P. 273–279. doi: 10.1002/masy.19920570125

95. Tseng M., Hoang K.C., Yang M.K., Yang S.F., Chu W.S. Polyester-degrading thermophilic actinomycetes isolated from different environment in Taiwan // Biodegradation. 2007. V. 18. No. 5. P. 579–583. doi: 10.1007/s10532-006-9089-z

96. Mohanan N., Montazer Z., Sharma P.K., Levin D.B. Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics // Front. Microbiol. 2020. V. 11. Article No. 580709. doi: 10.3389/fmicb.2020.580709

97. Müller R.J., Schrader H., Profe J., Dresler K., Deckwer W.D. Enzymatic degradation of poly(ethylene terephthalate): rapid hydrolysis using a hydrolase from *T. fusca* // Macromol. Rapid Commun. 2005. V. 26. P. 1400–1405. doi: 10.1002/marc.200500410

98. Fett W.F., Wijey C., Moreau R.A., Osman S.F. Production of cutinase by *Thermomonospora fusca* ATCC 27730 // J. Appl. Microbiol. 1999. V. 86. No. 4. P. 561–568. doi: 10.1046/j.1365-2672.1999.00690.x
99. Hu X., Thumarat U., Zhang X., Tang M., Kawai F. Diversity of polyester-degrading bacteria in compost and molecular analysis of a thermoactive esterase from *Thermobifida alba* AHK119 // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2010. V. 87. No. 2. P. 771–779. doi: 10.1007/s00253-010-2555-x
100. Islam S., Apitius L., Jakob F., Schwaneberg U. Targeting microplastic particles in the void of diluted suspensions // Environ. Int. 2019. V. 123. P. 428–435. doi: 10.1016/j.envint.2018.12.029
101. Baker P.J., Poultney C., Liu Z., Gross R.A., Montclare J.K. Identification and comparison of cutinases for synthetic polyester degradation // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 93. P. 229–240. doi: 10.1007/s00253-011-3402-4
102. Gamerith C., Zartl B., Pellis A., Guillaumot F., Marty A., Herrero Acero E., Guebitz G.M. Enzymatic recovery of polyester building blocks from polymer blends // Process Biochem. 2017. V. 59. P. 58–64. doi: 10.1016/j.procbio.2017.01.004
103. Eberl A., Heumann S., Brückner T., Araujo R., Cavaco-Paulo A., Kaufmann F., Kroutil W., Guebitz G.M. Enzymatic surface hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) and bis(benzoyloxyethyl) terephthalate by lipase and cutinase in the presence of surface active molecules // J. Biotechnol. 2009. V. 143. No. 3. P. 207–212. doi: 10.1016/j.jbiotec.2009.07.008
104. Huerta Lwanga E., Thapa B., Yang X., Gertsen H., Salánki T., Geissen V., Garbeva P. Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration // Sci. Total Environ. 2018. V. 624. P. 753–757. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.144
105. Avio C.G., Gorbi S., Regoli F. Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat // Mar. Environ. Res. 2017. V. 128. P. 2–11. doi: 10.1016/j.marenvres.2016.05.012

Фотосинтетическая активность подростка хвойных в связи с промышленными рубками

© 2024. В. В. Тужилкина, 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: tuzhilkina@ib.komisc.ru

В статье рассматривается функционирование хвойного подростка предварительной и последующей генераций на вырубках в связи с промышленными рубками в подзоне средней тайги Республики Коми. Изучены пигментная деятельность, фотосинтетическая и дыхательная способности ассимиляционного аппарата подростка сосны (*Pinus sylvestris* L.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.) на 3- и 10-летних вырубках после сплошнолесосечных рубок ельника и сосняка с помощью спектрофотометрического и газометрического методов. Выявлена функциональная перестройка пигментного аппарата у елового подростка предварительной генерации на вырубках. Хвоя приспосабливается к условиям среды на уровне пигментной системы путём изменения содержания и соотношения хлорофиллов и каротиноидов. Изменения в пластидах у елового подростка на 3-летней вырубке происходили за счёт снижения концентрации хлорофиллов и каротиноидов, а на 10-летней вырубке – активизации синтеза пигментов, что влияет на усвоение углекислоты в хлоропластах. Показано, что ассимиляционный аппарат подростка ели на вырубках поглощает CO_2 в 1,4 и 1,8 раза активнее, чем под пологом леса. Фотосинтетическая и дыхательная способности хвои елового подростка на вырубках не различаются, что свидетельствует о стабильном уровне важных процессов жизнедеятельности у подростка в течение десяти лет после рубки древостоя. Установлено, что хвоя подростка сосны и ели на вырубках способна поглощать CO_2 с довольно высокой скоростью до 5,73 и 2,7 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ соответственно. Это способствует накоплению в ней ассимилятов и использованию их в процессах роста, а в итоге, увеличению продуктивности подростка на вырубках после сплошной рубки древостоя.

Ключевые слова: ель, сосна, подрост, хвоя, промышленные рубки, вырубка, пигменты, фотосинтез, дыхание.

Photosynthetic activity of coniferous undergrowth after industrial felling

© 2024. V. V. Tuzhilkina ^{ORCID: 0000-0002-4415-6598}

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: tuzhilkina@ib.komisc.ru

The functioning of coniferous undergrowth of preliminary and subsequent generations after industrial felling was considered in the middle taiga subzone of the Komi Republic. Using spectrophotometric and gasometric methods we analyzed the pigment activity, photosynthetic, and respiratory abilities of the assimilation apparatus of pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea obovata* Ledeb.) undergrowth at the 3- and 10-year old clearings. The pigment apparatus functional rearrangement of the preliminary generation spruce undergrowth at clearings was found. Needles adapt to environmental conditions at the pigment system level by changing the content and ratio of chlorophylls and carotenoids. Changes in plastids in the spruce undergrowth at the 3-year clearings occurred due to a decrease in chlorophyll and carotenoid concentrations, and at the 10-year clearings due to activation of pigment synthesis which affects the carbon dioxide absorption in chloroplasts. The assimilation apparatus of spruce undergrowth at clearing absorbs CO_2 by 1.4 and 1.8 time more actively than that under the forest canopy. The photosynthetic and respiratory abilities of spruce needles at clearings do not differ. This indicates a stable level of important vital processes for the studied undergrowth at clearings during ten years after felling. Pine and spruce undergrowth needles are able to absorb CO_2 at a fairly high rate up to 5.73 and 2.7 $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ respectively. This rate contributes to the accumulation of assimilates in pine needles and their use for growth which logically increases the productivity of undergrowth at clearings. In general, the functional organization of spruce and pine undergrowth assimilating organs ensures their growth and favors the successful restoration of conifers at clearings in the middle taiga subzone of the European North-East.

Keywords: spruce, pine, undergrowth, needles, industrial felling, clearing, pigments, photosynthesis, respiration.

Промышленные рубки лесов являются значительным антропогенным стрессом, ведущим к трансформации лесных экосистем. Для Республики Коми эта проблема актуальна в связи с проведением интенсивной эксплуатации хвойных лесов. В лесном фонде республики рубками ежегодно охвачено в среднем 58 тыс. га, объём заготавливаемой древесины составляет 8–10 млн м³. В связи с этим проблеме восстановления леса на вырубках европейского Севера России придаётся всё большее значение. Важная роль при этом отводится эффективности естественного возобновления леса [1]. На 55–65% площади вырубок европейского Севера-Востока лесовосстановление осуществляется за счёт сохранения подроста хвойных пород [2].

В лесных сообществах после рубки происходят существенные изменения физико-химических свойств почв [3], запасов и потоков углерода [4–6] и экологических условий среды, которые влияют на функционирование подроста древесных растений. Следует отметить, что для ускоренного возобновления леса на сплошных вырубках необходимо знать основные процессы жизнедеятельности подроста как возобновившегося, так и сохранившегося после сплошнолесосечной рубки хвойных лесов. На территории европейского Севера России характер изменений физиологических процессов подроста хвойных после промышленных рубок рассматривался в 1970-е годы в единичных работах [6, 7]. В последнее время всё больше внимания уделяется изучению ответных физиологических реакций хвои подроста ели и сосны на изменение условий среды, связанных с проведением рубок ухода во вторичных сообществах [8–10]. В Республике Коми, где интенсивно ведутся промышленные рубки, основные процессы жизнедеятельности подроста на вырубках ельников и сосняков не изучались.

Цель данной работы – исследование пигментного комплекса, фотосинтетической и дыхательной способности хвои подроста сосны и ели на сплошных вырубках, и использование физиологических параметров для оценки естественного возобновления хвойных в средней тайге (Республика Коми).

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территории Чернамского лесоэкологического стационара (62°00' с. ш. и 50°20' в. д.) Института биологии Коми научного центра и Сыктывкарского

лесничества (61°35' с. ш., 51°02' в. д.) Республики Коми [11]. Объектами были подрост ели (высота около 1,0 м, возраст 25 лет), произрастающий под пологом древостоя и на 3- и 10-летней вырубках после сплошнолесосечной рубки хвойных лесов, и сосновый подрост высотой 1–1,3 м, возобновившийся на 10-летней вырубке сосняка черничного влажного. Следует отметить, что сплошнолесосечная рубка древостоя была проведена в зимний период.

Для исследований динамики фотосинтетических пигментов в течение вегетации 2016 г. (30 мая, 8 июля, 2 сентября) и 2018 г. (30 мая, 18 июля, 11 октября) отбирали образцы однолетней хвои с 10 деревьев подроста ели и сосны. Такая биологическая повторность считается достаточной для достоверной характеристики биохимического состава хвои [12]. Побеги срезали с середины кроны с южной стороны дерева. Количественный анализ фотосинтетических пигментов проводили спектрофотометрически на приборе UV-1800 (Shimadzu, Япония) в ацетоновых экстрактах. Расчёт доли хлорофилла в светособирающем комплексе (ССК) производили с учётом того, что весь хлорофилл *b* находится в ССК, а соотношение хлорофиллов *a/b* в ССК равно 1,2 [13, 14].

Фотосинтетическую способность оценивали по поглощению CO₂, измеренной инфракрасным (ИК) газоанализатором Li COR 6400 (Li COR, США) при насыщающей освещённости, температуре 20 °С и влажности 70%. Дыхание измеряли по выделению CO₂ ИК-газоанализатором в темноте при 20 °С, влажности воздуха 70%, естественной концентрации CO₂ в воздухе. Объект экспонировали в контролируемой камере 64002–2L (Li COR, США) до установления постоянной скорости CO₂-газообмена. Измерения фотосинтеза и дыхания хвои проводили на интактных побегах древесных растений в июле.

Статистическую обработку полученных данных проводили на персональном компьютере с использованием программ Excel и Statistica. Значимость отличий исследуемых показателей проверяли с помощью критерия Стьюдента. В таблицах даны среднеарифметические значения и их стандартные ошибки.

Результаты и обсуждение

Пигменты. Известно, что содержание и соотношение пигментов в листьях является одним из биохимических показателей реакции растений на изменение факторов среды, степени их адаптации к новым экологическим усло-

виям и может служить критерием при оценке функционирования растений. Исследования пигментной системы подростка сосны и ели на 10-летних вырубках показали, что общий фонд фотосинтетических пигментов изменяется в течение вегетации. Летом и в начале осени в хвое накапливалось наибольшее количество хлорофиллов, которое сопровождалось развитием тилакоидной системы хлоропластов [15]. Максимальное количество хлорофиллов в хвое ели и сосны в этот период отмечалось ранее для взрослых деревьев [16–18]. Поздней осенью с наступлением холодной и дождливой погоды в связи с перестройкой пластидного аппарата концентрация хлорофилла в хвое у подростка сосны снижалась на 14% по сравнению с летом (рис. 1). Величина соотношения хлорофиллов *a* и *b* снизилась с 4,1 до 2,8, что обусловлено торможением биосинтеза хлорофилла *a*, связанного с двумя фотосистемами. Доля хлорофилла в ССК в течение вегетации хвойных растений изменялась и составляла у подростка сосны 50–59%, а у ели – 50–66% от общего фонда зелёных пигментов.

Характер сезонной динамики каротиноидов, в отличие от хлорофиллов, как у елового подростка, так и соснового на черничных вырубках идентичен. Летом отмечается наименьшее количество жёлтых пигментов. К осени их фонд повышается, что свидетельствует об увеличении их содержания в пигментном аппарате, выполняющем протекторную роль [19, 20].

Полученные данные по содержанию фотосинтетических пигментов у подростка ели

позволили выявить различия в зависимости от условий произрастания. Так, в однолетней хвое елового подростка, произрастающего на 3-летней вырубке в условиях повышенной освещённости, после рубки древостоя накапливается хлорофиллов на 13,4% меньше, чем под пологом леса (табл. 1). На 10-летней вырубке, наоборот, в хвое подростка содержание зелёных пигментов на 28%, жёлтых на 33% выше, чем в ельнике. Изменения в пигментном комплексе хвои у подростка на 3-летней вырубке происходили за счёт уменьшения обеих форм хлорофилла, а на 10-летней – увеличения синтеза хлорофилла *a*. Для пигментного комплекса елового подростка, произрастающего под пологом древостоя, характерен более высокий показатель отношения хлорофиллов *a/b*, что указывает на сравнительно меньшую величину ССК.

Сравнительная оценка фонда пигментов подростка ели на вырубках в зависимости от давности рубки свидетельствует о различном накоплении зелёных пигментов. На третий год после рубки сосняка черничного в хвое елового подростка хлорофиллов содержится в 1,2 раза больше, чем на 10-летней вырубке ельника черничного, что, вероятно, обусловлено изменением экологических условий среды. Относительно постоянными на обеих вырубках являются величины соотношения хлорофиллов *a* и *b*. Хвоя подростка ели на вырубках характеризуется довольно стабильным накоплением фотосинтетических пигментов, относящихся к светособирающему комплексу.

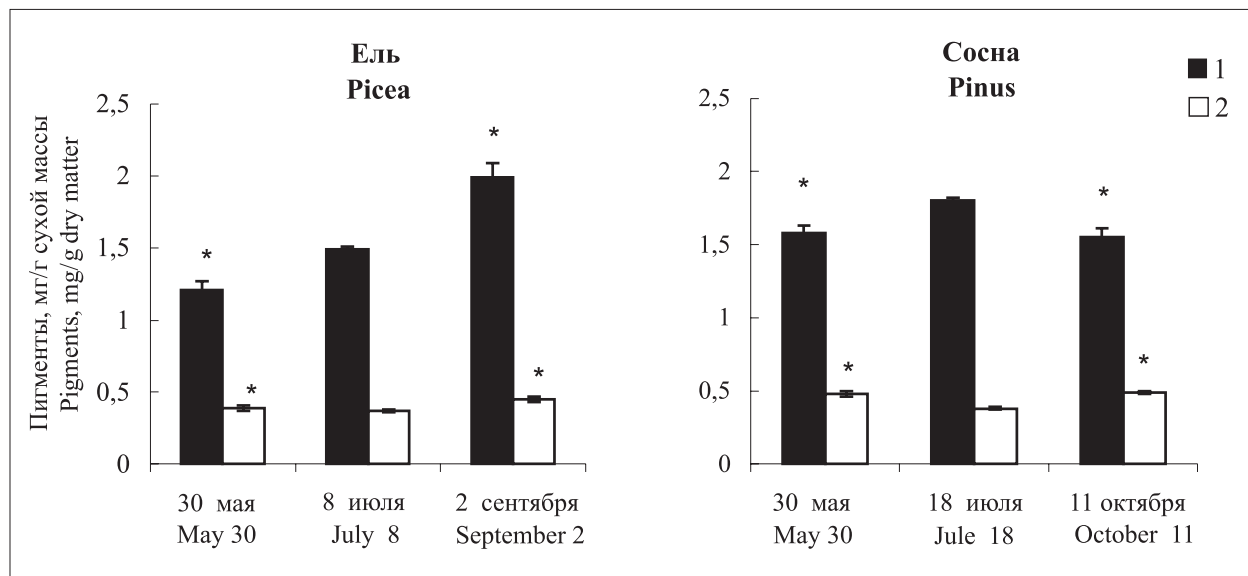


Рис. 1. Сезонная динамика фотосинтетических пигментов в хвое подростка ели и сосны на вырубках: 1 – хлорофилл *a+b*; 2 – каротиноиды; * – различия достоверны при $p \leq 0,01$

Fig. 1. Seasonal dynamics of photosynthetic pigments in spruce and pine undergrowth needles in cuttings: 1 – chlorophyll *a+b*; 2 – carotenoids; * – differences are significant at $p \leq 0.01$

Таблица 1 / Table 1

Содержание фотосинтетических пигментов в хвое елового подроста, июль 2018 г.
The photosynthetic pigments content in the needles of *Picea* undergrowth, July, 2018

Показатель Characteristics	Вырубка / Cutting		Лес / Forest	
	3-летняя 3-year	10-летняя 10-year	сосняк pine	ельник spruce
Хлорофилл <i>a+b</i> , мг/г сухой массы Chlorophyll <i>a+b</i> , mg/g dry weight	1,72±0,08	1,49±0,02***	1,90±0,02*	1,08±0,11**
Каротиноиды, мг/г сухой массы Carotenoids, mg/g dry weight	0,39±0,02	0,37±0,01	0,41±0,01	0,26±0,03*
Хлорофилл <i>a</i> / Хлорофилл <i>b</i> Chlorophyll <i>a</i> / Chlorophyll <i>b</i>	2,51	2,50	2,44	3,0
Доля хлорофиллов в ССК, % Share of chlorophyll in LHC, %	63	63	64	54
Хлорофилл / Каротиноиды Chlorophyll / Carotenoids	4,46	4,0	4,68	4,20

Примечание: ССК – светособирающий комплекс. Различия достоверны: * – на 3-летней вырубке и под пологом сосняка ($p \leq 0,05$); ** – на 10-летней вырубке и под пологом ельника ($p \leq 0,05$); *** – на 3- и 10-летней вырубках ($p \leq 0,01$).

Note: LHC – light-harvesting complex. The differences are significant: * – on a 3-year clearing and under a canopy of a pine forest ($p \leq 0.05$); ** – on a 10-year clearing and under a canopy of a spruce forest ($p \leq 0.05$); *** – on a 3-year and on a 10-year cuttings ($p \leq 0.1$).

Таблица 2 / Table 2

Интенсивность CO_2 -газообмена хвои подроста древесных растений на вырубках
 CO_2 -exchange intensity in undergrowth needles of woody plants on cuttings

Параметр Parameter	Ель / Spruce		Сосна / Pine
	возраст вырубки, лет / age of cutting, year		
	3	10	10
Максимальная скорость видимого фотосинтеза, мкмоль $CO_2/(m^2 \cdot c)$ (Φ_{max}) The maximum rate of visible photosynthesis, $\mu mol CO_2/(m^2 \cdot s)$ (F_{max})	2,44±0,28*	2,69±0,06*	5,73±0,50
Скорость темного дыхания, мкмоль $CO_2/(m^2 \cdot c)$ (Дт) Dark respiration rate, $\mu mol CO_2/(m^2 \cdot s)$ (Dt)	-0,30±0,04	-0,20±0,08	-0,37±0,01
$\Phi_{max}/Дт$ F_{max}/Dt	8,1	13,4	15,5

Примечание: * – различия с сосной достоверны при $p \leq 0,01$.

Note: * – the differences with pine are significant at $p \leq 0.01$.

Таким образом, изменение содержания фотосинтетических пигментов в хвое елового подроста предварительной генерации после рубки древостоя свидетельствует о способности пигментной системы адаптироваться к новым условиям существования.

CO_2 -газообмен. Для выяснения особенностей фотосинтетической способности подроста ели и сосны на вырубках нами изучалась максимальная дневная интенсивность фотосинтеза хвои. Этому показателю придают большое значение многие исследователи, так как он характеризует потенциальные возможности ассимиляционной деятельности растений [21]. Летом при более благоприятном сочетании температурных

и световых условий хвоя древесных растений на вырубках усваивает CO_2 с высокой скоростью и достигает максимальных значений (табл. 2). Измерения CO_2 -газообмена хвои ели, проведенные при температуре 20–22 °С и насыщенной интенсивности света показали, что максимальные скорости видимого фотосинтеза у подроста под пологом в сосняке и ельнике составляют 1,36 и 1,90 мкмоль $CO_2/(m^2 \cdot c)$ соответственно. Через 3 года после рубки древостоя при насыщающей освещенности интенсивность видимого фотосинтеза хвои ели на вырубке увеличилась в 1,4 раза по сравнению фотосинтетической активностью подроста, произраставшего под пологом леса (рис. 2). На вырубке 10-летней давности эта

величина почти в 2 раза выше, чем под пологом древостоя.

Повышенная интенсивность фотосинтеза хвои у подростка ели после сплошной и выборочной рубки древостоя отмечалась ранее другими исследователями [7, 8, 22, 23]. Следовательно, улучшение условий освещения сохранившегося елового подростка предварительной генерации при проведении сплошной рубки приводит к увеличению максимальной интенсивности видимого фотосинтеза. Несмотря на то, что у елового подростка на вырубке наблюдается тенденция к повышению максимально возможной ассимиляционной способности, достоверных различий по этому показателю на вырубках различной давности не выявлено (табл. 2). В дни с переменной облачностью, характерной для изучаемого региона [24], скорость поглощения CO₂ хвоей снижалась на 40–45% от максимальной интенсивности фотосинтеза. Следует отметить, что на 10-летней вырубке сосняка черничного у возобновившейся сосны максимальная интенсивность фотосинтеза в 2 раза выше по сравнению с еловым подростом предварительной генерации, что обусловлено как видовой специфичностью, так и в некоторой степени возрастом подростка. В отличие от данных, полученных нами ранее по максимальной скорости видимого фотосинтеза 90-летних хвойных пород в ельниках и сосняках [25, 26], хвоя подростка ели и сосны на вырубках

поглощала CO₂ соответственно в 1,5 и 1,7 раза активнее, что свидетельствует об её повышенной фотосинтетической способности.

Измерение выделения CO₂ хвои елового подростка в темноте при 20 °C и влажности 70% показало, что на вырубках хвойных сообществ отсутствует различие по интенсивности дыхания (табл. 2). Ассимиляционный аппарат подростка ели на вырубках при относительно благоприятных температурных и световых условиях характеризуется низкими показателями соотношения фотосинтез/дыхание. Этот показатель на 3-летней вырубке сосняка черничного составил 12,3, а на 10-летних вырубках ельника и сосняка черничных типов – 6,5 и 7,4% соответственно от максимальной скорости поглощения CO₂, что свидетельствует о небольших энергетических затратах, используемых для роста подростка.

Заключение

Промышленные рубки таёжных лесов на Севере являются значимыми факторами, влияющими на сохранность и функционирование подростка ели и сосны как предварительной, так и последующей генерации.

Приведены новые сведения об интенсивности физиолого-биохимических процессов подростка хвойных после промышленных рубок в подзоне средней тайги. Выявлены адаптивные реакции подростка ели предварительной генерации на проведение сплошнорубочной рубки древостоя на уровне пигментной системы. Хвоя ели реагирует на изменение экологических условий среды через 3 года после рубки понижением концентрации хлорофиллов и каротиноидов, а через 10 лет – повышением содержания пигментов, что влияет на усвоение углекислоты в хлоропластах и способствует активизации фотосинтетической деятельности хвои.

Полученные нами результаты по скорости CO₂-газообмена подростка хвойных показали, что фотосинтетическая способность хвои у сохранившегося подростка ели на вырубках в 1,5 раза выше по сравнению как с подростом, произрастающим под пологом леса, так и в сравнении со взрослыми 90-летними деревьями. Хвоя подростка ели и сосны на вырубках способна поглощать углекислоту со скоростью до 2,7 и 5,73 мкмоль CO₂/(м² · с) соответственно, что способствует накоплению фотоассимилятов и их использованию в процессах роста. В целом, функциональная организация ассимилирующих органов ели

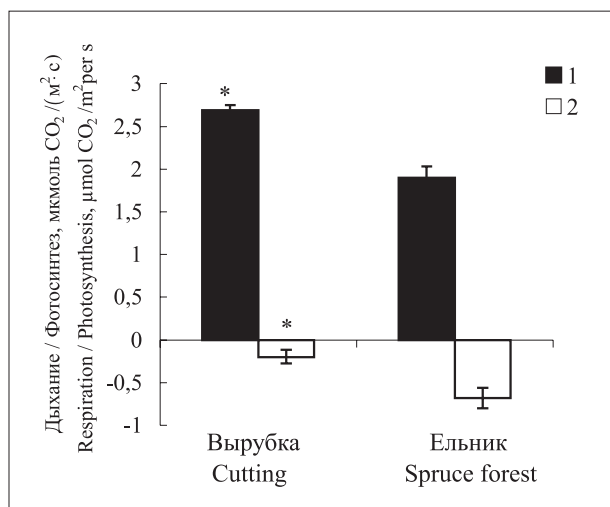


Рис. 2. Интенсивность CO₂-газообмена хвои елового подростка на вырубке и в ельнике черничном: 1 – фотосинтез; 2 – дыхание; * – различия достоверны при p≤0,01

Fig. 2. Intensity of CO₂-gas exchange in the needles of spruce undergrowth on the clearing and in blueberry spruce forest: 1 – photosynthesis; 2 – respiration; * – the differences are significant at p≤0.01

и сосны на вырубках обеспечивает успешный рост хвойного подроста и способствует ускоренному лесовосстановлению в подзоне средней тайги Республики Коми.

Таким образом, знание о влиянии промышленных рубок на основные физиологические процессы подроста хвойных важно для понимания механизмов влияния антропогенных нагрузок на функционирование лесного сообщества и для оценки естественного возобновления хвойных пород при их интенсивной эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН, номер гос. регистрации 1220401000318.

Автор благодарен ведущему инженеру отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН С. Н. Кузину за помощь при работе с газоанализатором.

Литература

1. Цветков В.Ф. Потенциал лесовозобновления на вырубках Европейского Севера России // Лесоведение. 2010. № 3. С. 3–14.
2. Ларин В.Б., Паутов Ю.А. Формирование хвойных молодняков на вырубках северо-востока европейской части СССР. Л.: Наука, 1989. 142 с.
3. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. doi: 10.7868/S0032180X17070024
4. Лиханова Н.В., Бобкова К.С. Пулы и потоки углерода в экосистемах вырубки ельников средней тайги Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 91–100. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100
5. Осипов А.Ф., Тужилкина В.В., Дымов А.А., Бобкова К.С. Запасы фитомассы и органического углерода среднетаёжных ельников при восстановлении после сплошнолесосечной рубки // Известия РАН. Серия биологическая. 2019. № 2. С. 215–224. doi: 10.1134/S0002332919020103
6. Веретенников А.В., Бурмина Л.Н. К вопросу о влиянии давности рубки на физиологические процессы подроста ели в условиях долгомошных вырубок // Доклады Академии наук СССР. 1963. Т. 148. № 6. С. 1422–1424.
7. Леина Г.Д. Фотосинтез елового подроста под пологом и на вырубках ельника черничника свежего в связи с давностью рубки // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса / Отв. ред. Ю. Л. Цельникер. М.: Наука, 1967. С. 232–236.
8. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Эколого-физиологические особенности ели в березняках черничных. Архангельск: ИД САФУ, 2014. 375 с.
9. Зарубина Л.В., Коновалов В.Н. Динамика накопления пластидных пигментов у подроста ели при онтогенезе березняка черничного // Лесной журнал. 2018. № 3. С. 54–64. doi: 10.17238/issn 0536-1036.2018.3.54
10. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Отток и распределение ^{14}C -ассимилятов у ели при выборочных рубках в северо-таёжных фитоценозах // Лесной журнал. 2019. № 2. С. 40–55. doi: 10.17238/issn 0536-1036.2019.2.40
11. Осипов А.Ф. Эмиссия CO_2 с поверхности отдельных технологических элементов вырубок среднетаёжных сосняков черничных // Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции. Киров: ВятГУ, 2019. С. 138–141.
12. Helmisaari H.S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles // Silva Fennica. 1992. V. 26. No. 3. P. 145–153. doi: 10.14214/sf.a15643
13. Lichtenthaler N.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
14. Maslova T.G., Popova I.A. Adaptive properties of the plant pigment systems // Photosynthetica. 1993. V. 29. P. 195–203.
15. Плюснина С.Н., Тужилкина В.В. Структурно-функциональная характеристика фотосинтетического аппарата подроста *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в подзоне средней тайги европейского Северо-Востока // Ботанический журнал. 2021. Т. 106. № 11. С. 1072–1084. doi: 10.31857/S0006813621110077
16. Ладанова Н.В., Тужилкина В.В. Структурная организация и фотосинтетическая активность хвои ели сибирской. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1992. 95 с.
17. Ottander C., Campbell D., Quist G. Seasonal changes in photosystem II organisation and pigment composition in *Pinus sylvestris* // Planta. 1995. V. 197. P. 176–183. doi: 10.1007/BF00239954
18. Тужилкина В.В. Пигментный комплекс хвои сосны в лесах европейского северо-востока // Лесоведение. 2012. № 4. С. 16–23.
19. Demmig-Adams B., Adams III W.W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1992. V. 43. P. 599–626. doi: 10.1146/annurev.pp.43.060192.003123
20. Головки Т.К., Табаленкова Г.Н., Дымова О.В. Пигментный комплекс растений Приполярного Урала // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 11. С. 1732–1741.
21. Вознесенский В.Л. Фотосинтез пустынных растений. Л.: Наука, 1977. 256 с.
22. Коссович Н.Л. Фотосинтез и продуктивность 45-летних елей в елово-лиственном древостое в результате рубок ухода шестилетней давности // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса / Отв. ред. Ю. Л. Цельникер. М.: Наука, 1967. С. 129–150.
23. Катрушенко И.В. Фотосинтез подроста ели во вторичных сообществах южной тайги // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса / Отв. ред. Ю. Л. Цельникер. М.: Наука, 1967. С. 237–242.
24. Галенко Э.П. Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1983. 128 с.
25. Тужилкина В.В., Плюснина С.Н. Комплексная оценка состояния хвои *Picea obovata* (Pinaceae) в условиях

аэротехногенного загрязнения // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50. № 4. С. 75–83.

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

References

1. Tsvetkov V.F. Potential of reforestation in felled areas of the Russian European North // Lesovedenie. 2010. No. 3. P. 3–14 (in Russian).

2. Larin V.B., Pautov Yu.A. Formation of coniferous young trees in the cuttings of the North-East of the European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1989. 142 p. (in Russian).

3. Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review // Pochvovedenie. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17070024

4. Likhanova N.V., Bobkova K.S. Pools and carbon fluxes in felling ecosystems spruce forests of the middle taiga of the Komi Republic // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 91–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-091-100

5. Osipov A.F., Tuzhilkina V.V., Dymov A.A., Bobkova K.S. Phytomass and organic carbon stocks in the middle taiga spruce forests during restoration after clear cutting // Izvestiya RAN. Serya biologicheskaya. 2019. No. 2. P. 215–224 (in Russian). doi: 10.1134/S0002332919020103

6. Veretennikov A.V., Burmina L.N. On the effect of the age of felling on the physiological processes of spruce undergrowth in conditions of long-term felling // Doklady Akademii nauk SSSR. 1963. V. 148. No. 6. P. 1422–1424 (in Russian).

7. Leina G.D. Photosynthesis of spruce undergrowth under the canopy and on the cuttings of fresh blueberry spruce forest in connection with the prescription of logging // Light regime, photosynthesis and forest productivity / Ed. Yu.L. Tselniker. Moskva: Nauka, 1967. P. 232–236 (in Russian).

8. Zarubina L.V., Konovalov V.N. Ecological and physiological features of spruce in blueberry birch forests. Arkhangel'sk: ID SAFU, 2014. 375 p (in Russian).

9. Zarubina L.V., Konovalov V.N. Accumulation dynamics of plastid pigments in spruce undergrowth in ontogenesis of the bilberry birch forest // Lesnoy Zhurnal. 2018. No. 3. P. 54–64 (in Russian). doi: 10.17238/issn 0536-1036.2018.3.54

10. Konovalov V.N., Zarubina L.V. Outflow and distribution of spruce ¹⁴C-assimilates after selective felling in the northern taiga phytocenoses // Lesnoy Zhurnal. 2019. No. 2. P. 40–55 (in Russian). doi: 10.17238/issn 0536-1036.2019.2.40

11. Osipov A.F. CO₂ emission from the surface of individual technological elements of cuttings of middle taiga blueberry pine forests // Conservation of forest ecosystems: problems and solutions: materialy mezhdunarodny

nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kirov: VyatGU, 2019. P. 138–141 (in Russian).

12. Helmisaari H.S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles // Silva Fennica. 1992. V. 26. No. 3. P. 145–153. doi: 10.14214/sf.a15643

13. Lichtenthaler N.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

14. Maslova T.G., Popova I.A. Adaptive properties of the plant pigment systems // Photosynthetica. 1993. V. 29. P. 195–203.

15. Plyusnina S.N., Tuzhilkina V.V. Structural and functional characteristics of the photosynthetic apparatus of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) regrowth in the middle taiga subzone of the European North-East // Botanicheskiy zhurnal. 2021. V. 106. No. 11. P. 1072–1084 (in Russian). doi: 10.31857/S0006813621110077

16. Ladanova N.V., Tuzhilkina V.V. Structural organization and photosynthetic activity of Siberian spruce needles. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 1992. 95 p. (in Russian).

17. Ottander C., Campbell D., Quist G. Seasonal changes in photosystem II organisation and pigment composition in *Pinus sylvestris* // Planta. 1995. V. 197. P. 176–183. doi: 10.1007/BF00239954

18. Tuzhilkina V.V. Pigment complex of pine in phytocenoses of the European North-East // Lesovedenie. 2012. No. 4. P. 16–23 (in Russian).

19. Demmig-Adams B., Adams III W.W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1992. V. 43. P. 599–626. doi: 10.1146/annurev.pp.43.060192.003123

20. Golovko T.K., Tabalenkova G.N., Dymova O.V. Pigment apparatus of subpolar Ural plants // Botanicheskiy zhurnal. 2007. V. 92. No. 11. P. 1732–1741 (in Russian).

21. Voznesensky V.L. Photosynthesis of desert plants. Leningrad: Nauka, 1977. 256 p. (in Russian).

22. Kossovich N.L. Photosynthesis and productivity of 45-year-old fir trees in the spruce-deciduous stand as a result of logging 6 years ago // Light regime, photosynthesis and forest productivity / Ed. Yu.L. Tselniker. Moskva: Nauka, 1967. P. 129–150 (in Russian).

23. Katrushenko I.V. Photosynthesis of spruce undergrowth in secondary communities of the southern taiga // Light regime, photosynthesis and forest productivity / Ed. Yu.L. Tselniker. Moskva: Nauka, 1967. P. 237–242 (in Russian).

24. Galenko E.P. Phytoclimate and energy factors of coniferous forest productivity in the European North. Leningrad: Nauka, 1983. 128 p. (in Russian).

25. Tuzhilkina V.V., Plyusnina S.N. Evaluation of *Picea obovata* (Pinaceae) needle condition under aerotechnogenic pollution // Plant Resources. 2014. V. 50. No. 4. P. 75–83 (in Russian).

26. Tuzhilkina V.V. Effect of aerotechnogenic impact of pulp and paper production on the pigment complex of Scots pine // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 90–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-090-096

Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе по данным спутниковых наблюдений

© 2024. А. П. Шевырнов, д. т. н., г. н. с., заведующий лабораторией,
А. А. Ларько, ведущий математик, Г. С. Высоцкая, к. т. н., с. н. с.,
Т. И. Писман, к. б. н., с. н. с., Л. А. Сомова, д. б. н., в. н. с.,
Институт биофизики Сибирского отделения РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50–50,
e-mail: lidsomova@mail.ru

Глобальное изменение климата приводит к трансформации и дисбалансу всех природных систем, к изменению границ биомов. В связи с этим возникла необходимость мониторинга границ наземных биомов и поиска методов определения границ биомов, экотон и контроля над ними. На основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли за 21-летний период определены границы биомов во всех природно-климатических зонах суши. Методической основой исследования является использование скользящей дисперсии NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Рассчитана динамика дисперсий вегетационного индекса NDVI, созданы растровые карты, отражающие неоднородность распределения полей дисперсий NDVI. Дисперсия NDVI биомов (зон с определённым типом растительности) имеет относительно низкие значения по сравнению с переходными зонами между ними (экотонами). В экотонах дисперсия NDVI значительно увеличивается. Сравнительный анализ растровой карты среднегодового распределения дисперсий NDVI с векторной картой растительности показал совпадение биомов с областями NDVI, имеющими низкую величину дисперсии. Такое представление информации позволило по спутниковым данным выделить границы биомов. В работе показана пространственно-временная сезонная динамика дисперсий NDVI, степень изменчивости которой позволяет определять наступление определённых фенологических событий. Метод скользящей дисперсии NDVI эффективен для определения границ биомов, их смещения и для анализа сезонной динамики биосистем в определённых биоклиматических зонах.

Ключевые слова: нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI), мониторинг биомов, дистанционное зондирование Земли, дисперсия NDVI, метод скользящего окна.

Monitoring the boundaries of terrestrial biomes on a global scale from data satellite observations

© 2024. А. П. Shevyrnogov ORCID: 0000-0001-8019-704X^{*}
А. А. Larko ORCID: 0000-0003-3691-451X^{*}, Г. С. Vysotskaya ORCID: 0000-0002-0434-7285^{*}
Т. I. Pisman ORCID: 0000-0001-8951-4662^{*}, Л. А. Somova ORCID: 0000-0002-7445-0384^{*}
Institute of Biophysics Siberian Branch RAS,
Akademgorodok 50-50, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
e-mail: lidsomova@mail.ru

Global climate change leads to the transformation and imbalance of all natural systems, to a change in the boundaries of biomes. In this regard, it became necessary to monitor the boundaries of land biomes and to search for methods for determining the boundaries of biomes, ecotones and their control. The aim of this work is to monitor the boundaries of biomes, and to study the seasonal dynamics of NDVI dispersion. The methodological basis of the study is satellite observations and the NDVI moving dispersion method. The dynamics of the moving dispersion of NDVI biomes and ecotones of the land from 2000 to 2020 is estimated in the work. As a result of research, a raster map of the spatial distribution of NDVI dispersions for various biomes (plant communities) was constructed. The raster map of the dispersion distribution of NDVI vegetation is based on MODIS satellite data (product MCD12C1). It is shown that dispersions of NDVI biomes (zones with a certain type of vegetation) have low values. In the transition zones between biomes in ecotones, the dispersion of NDVI increases significantly. The raster map was compared with a biome vector map. The coincidence of biomes on vector biological maps and raster maps showing dispersions of NDVI was revealed. The main factors determining the boundaries of biomes are the spatial and temporal distribution of temperatures, the greatest changes of which occur in the south of the tundra zone and in the north-boreal forests. Studies of the dynamics of biotemperature in the tundra for the period 2001–2020 years showed a positive trend. The results of the spatial

distribution of NDVI dispersions over the seasons of the year (winter, spring, summer, and autumn) give an idea of the dynamics of phenological processes on a global scale.

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), biome monitoring, Earth remote sensing, NDVI dispersion, moving split window method.

В настоящее время в связи с изменением климата возникла необходимость мониторинга границ биомов суши в глобальном масштабе. Возможности дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют следить за динамикой земной растительности (биомов) практически без ограничений по пространству и времени. Биом – совокупность экосистем одной природно-климатической зоны с одинаковым типом растительности. Это самые крупные подразделения биосферы [1]. Биомы отличаются друг от друга климатом, температурой и влажностью. Глобальное изменение климата приводит к трансформации и разбалансировке всех природных систем, к изменению границ биомов [2, 3]. Многочисленные примеры изменений биоценозов в биомах, характеристик популяций, видового разнообразия, изменения продуктивности отражены во многих публикациях [4–6]. Согласно современным климатическим моделям, в период с 1990 по 2100 гг. предполагается глобальное потепление от 1,4 до 5,8 °C [7], а также широтные сдвиги границ биомов до 400 км и изменение ширины экотонов [8, 9].

В настоящее время для изучения биосистем и их компонентов применяется картографирование с использованием ГИС-технологий, данные ДЗЗ и трудоёмкие полевые исследования [10, 11].

Изучение пространственно-временных изменений биосистем в глобальном и региональном масштабе, вызванных влиянием природных и антропогенных факторов, является одной из важнейших задач экологии [12]. А поиск способов и методов определения границ биомов, экотонов и их контроль является необходимостью при изменении климата.

Целью настоящей работы является мониторинг границ биомов и исследование сезонной динамики дисперсии NDVI в глобальном масштабе.

Объекты и методы исследования

В данной работе оценивается динамика скользящей дисперсии NDVI биомов и экотонов суши с 2000 по 2020 гг. В результате исследований построена растровая карта пространственного распределения дисперсий

NDVI для различных растительных сообществ и урбанизированных территорий. Пространственное распределение дисперсий NDVI по сезонам года даёт представление о динамике фенологических процессов. Растровая карта распределения дисперсий NDVI растительности сопоставляется с картой растительности (биомов), полученной на основе спутниковых данных MODIS (продукт MCD12C1).

Для описания динамики растительного покрова использовали вегетационный индекс NDVI [13], который основан на отражении и поглощении растительностью электромагнитного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазоне (1). Это простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы и универсальный индикатор как сезонной, так и многолетней динамики продуктивности растительности.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1),$$

где NIR – процент отражённой радиации в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – процент отражённой радиации в красном диапазоне.

Значения NDVI получены на основе данных сканера MODIS спутника Terra, в работе использован продукт MOD13C2. Разрешение 8 км (на линии экватора). Масштаб глобальный. Временной ряд наблюдений с 2000 по 2020 гг. Данные представляют собой месячные композитные изображения NDVI. В работе использован метод скользящего окна дисперсии NDVI, который впервые был применён для описания динамики хлорофилла в океане в 1996 г. авторами данной работы [14]. Метод скользящего окна дисперсии NDVI в экологических исследованиях суши стал использоваться недавно, несмотря на его простоту, надёжность и эффективность [15, 16].

Нами разработана методика оценки пространственного распределения скользящей дисперсии NDVI для оценки неоднородности растительности, так называемая процедура STA (Seasonal Trend Analysis) [17]. Для каждой точки изображения строились окна различной ширины, внутри которых рассчитывалась дисперсия NDVI по пространству и времени. Для анализа результатов динамики

пространственного распределения дисперсий NDVI в глобальном масштабе наиболее оптимальным оказалось окно размером 5×5 пикселей. Шкала (легенда) для оценки дисперсии NDVI разработана авторами.

Значения среднегодовых биотемператур вычислены по данным сайта Climatic Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/data>) за период с 2001 по 2020 гг. с разрешением 0.5°×0.5°. При вычислении среднегодовой биотемпературы принимаются во внимание только среднемесячные температуры выше нуля, температуры ниже нуля при суммировании учитываются как 0 °С [18].

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика дисперсий NDVI в глобальном масштабе. Пространственное распределение дисперсий NDVI показано на растровой карте (рис. 1, см. цв. вкладку II). Дисперсии рядов NDVI растительности суши отражают границы различных биомов. На рисунке зелёным цветом показаны области с низкими значениями дисперсии индекса NDVI, это зоны с одинаковым типом растительности, то есть биомы. Зоны с повышенной дисперсией значений NDVI на границах биомов показаны красным и белым цветом – это переходные зоны – экотоны. Именно они первыми реагируют на изменение внешних условий и поэтому являются индикаторами изменения экологического состояния экосистем.

Далее проведён сравнительный анализ биомов на растровой карте (рис. 1) и карте растительности (рис. 2, см. цв. вкладку II).

На рисунке 2 показано глобальное распределение растительности (биомов) на карте мира. По Международной геосферно-биосферной программе (МГБП) 17 классов растительного покрова были объединены в 9 классов. Леса – 21%, кустарники – 19%, саванны – 14%, пастбища – 9%, пахотные земли – 9%, мозаика пахотных земель и естественной растительности – 2%, бесплодные – 14%, городские – 0,5%, водно-болотные угодья – 0,2% и другие (снег и лёд, водоёмы – 11%) [19].

Сравнительный анализ растровой карты среднегодового распределения дисперсий NDVI, показывающих границы биомов (рис. 1), и векторной карты растительности (рис. 2) выявил, в основном, совпадение биомов на представленных картах. Наземные биомы обычно классифицируются по одинаковому типу растительности. Однако некоторые био-

мы по своей природе являются сложными по сочетанию типов растительности. К ним относятся антропогенно преобразованные районы (пахотные земли) и пастбищно-кустарниковые районы, поэтому там отмечаются более высокие значения дисперсии NDVI «внутри» биома (рис. 1).

Современные данные о границах биомов суши необходимы для понимания глобальных изменений в биосфере. На растровых картах (рис. 1) можно видеть как границы биомов, так и «экотонную мозаику» на границах биома и внутри биома (красные точки – повышенная дисперсия NDVI). «Красная мозаика» внутри биомов – это сочетание экосистем, формирующих биомы. Она не может быть обнаружена на векторной карте растительности, а используемый метод скользящей дисперсии даёт такую возможность. Изменение границ биомов и широтных размеров экотонов – фактор их динамики. Степень размытости границ биомов – это мера их изменчивости.

На рисунке 3 (см. цв. вкладку III) представлены результаты исследования динамики биотемпературы на территории тундры за период 2001–2020 гг. За этот период отмечен положительный тренд биотемпературы.

Анализ климатических изменений подтверждает, что интенсивный рост температуры воздуха наблюдается на территории Северной Евразии [20, 21]. Отмечено, что наибольшим изменениям подвергаются самые северные биомы, это юг тундровой зоны и северобореальные леса. Области наибольшего изменения – это северные и южные экотоны бореальных лесов Северного полушария [21, 22].

Таким образом, применение метода скользящего окна дисперсии NDVI позволяет в глобальном масштабе устанавливать реальные границы биомов суши и их смещение по увеличению дисперсии NDVI. Метод скользящего окна дисперсии NDVI может использоваться не только для контроля границ биомов, но и для определения «экологической» чувствительности экосистем к климату.

Сезонная динамика дисперсий NDVI различных биомов за период 2000-2020 гг. в глобальном масштабе. Продолжительность вегетационного периода является важной биоклиматической характеристикой, которая определяет фотосинтетическую активность (продуктивность) экосистем, а также является индикатором глобального потепления. На рисунке 4 (см. цв. вкладку III) показано пространственное распределение дисперсий NDVI по сезонам года (зима, весна, лето, осень),

**А. П. Шевырногов, А. А. Ларько, Г. С. Высоцкая,
Т. И. Письман, Л. А. Сомова**
**«Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе
по данным спутниковых наблюдений». С. 29.**

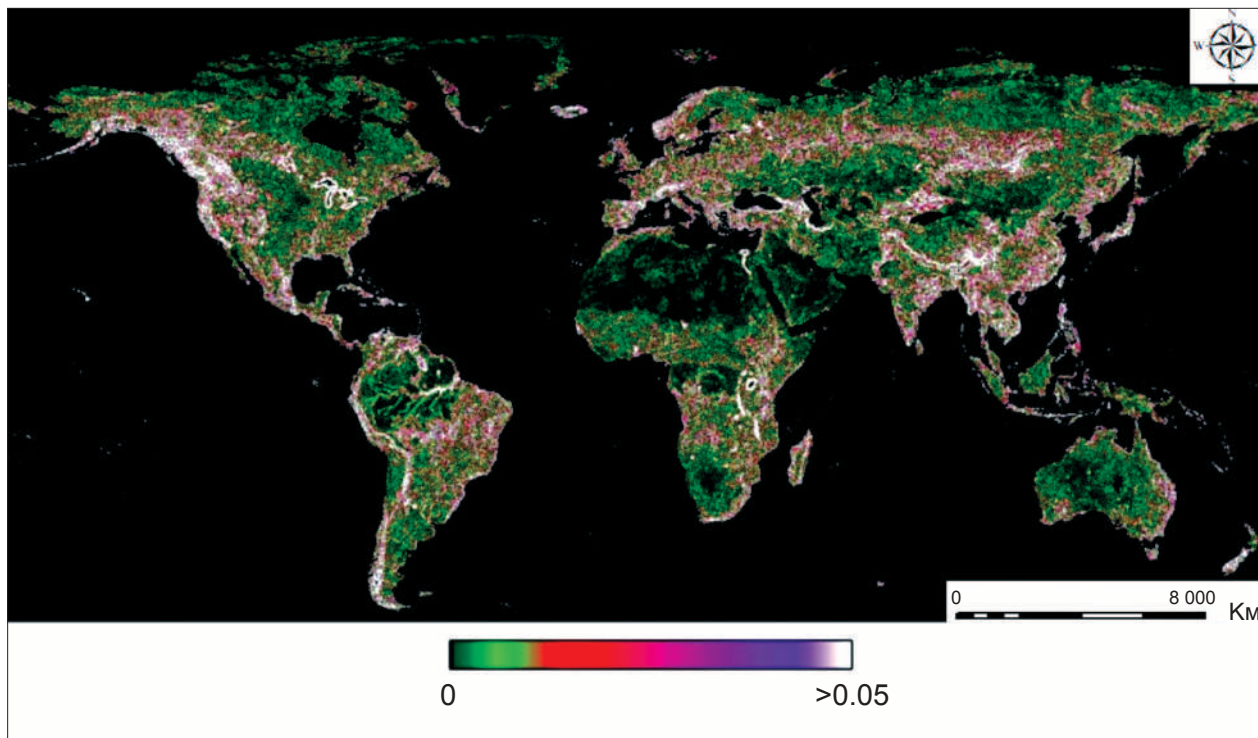


Рис. 1. Дисперсии NDVI различных биомов (2000–2020 гг.).
 Дисперсия: низкая – зелёный цвет; повышенная – красный цвет; высокая – белый цвет
Fig. 1. Dispersions of NDVI of various biomes (2000–2020).
 Dispersion: low – green; increased – red color; high – white color

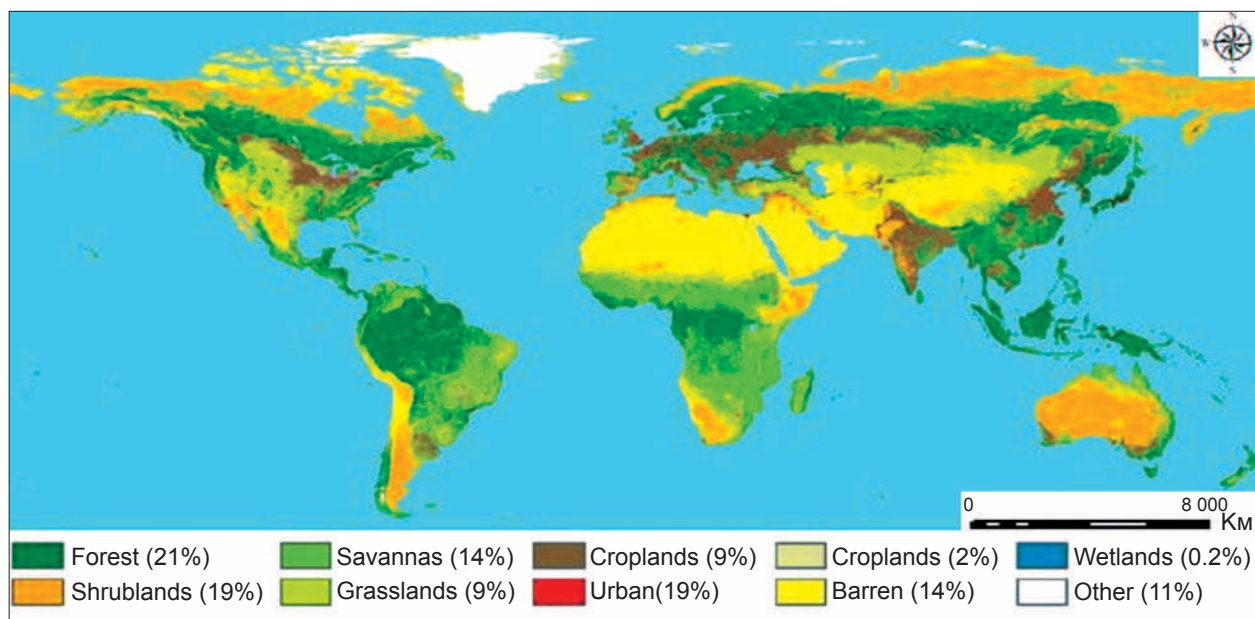


Рис. 2. Глобальное распределение растительности (биомов) на основе спутниковых данных MODIS (продукт MCD12C1). <https://seos-project.eu/landuse/landuse-c01-ws01-s.html>
Fig. 2. Global distribution of vegetation (biomes) based on MODIS satellite data (product MCD12C1)

**А. П. Шевырногов, А. А. Ларько, Г. С. Высоцкая,
Т. И. Письман, Л. А. Сомова**
**«Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе
по данным спутниковых наблюдений». С. 29.**

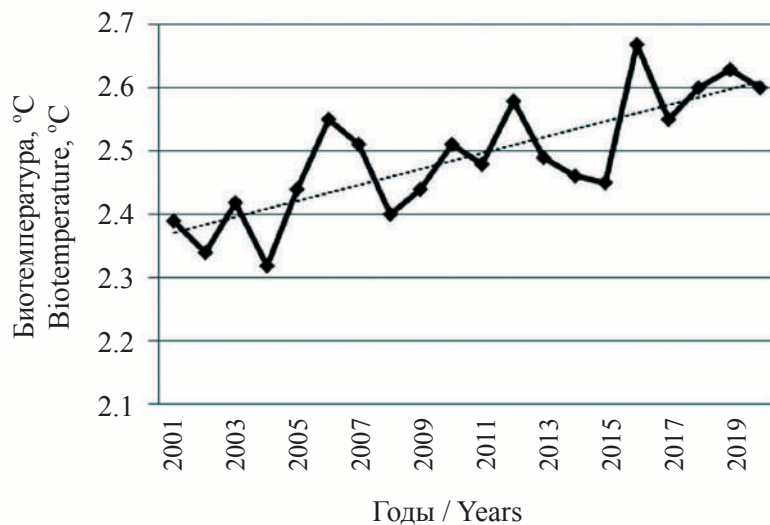


Рис. 3. Динамика биотемпературы на территории тундры за 2001–2020 гг.
Fig. 3. The dynamics of biotemperature in the tundra for 2001–2020

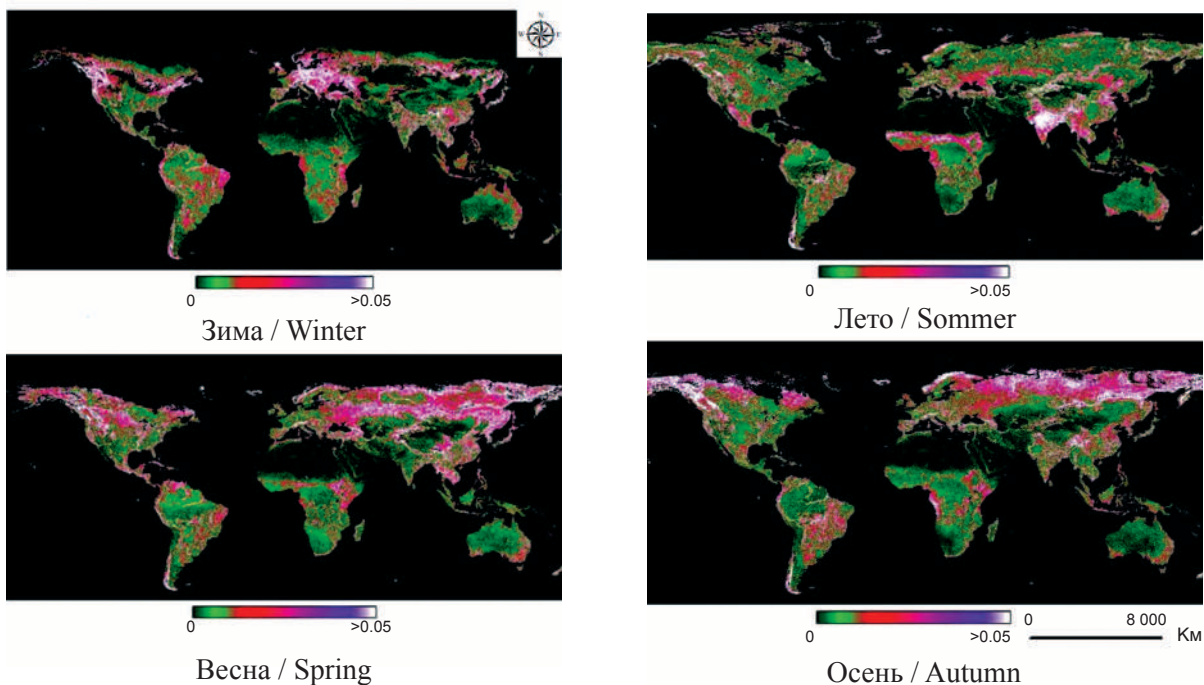


Рис. 4. Пространственное распределение дисперсий NDVI за период 2000–2020 гг. в течение вегетационного сезона (зима, весна, лето и осень)
Fig. 4. The spatial distribution of NDVI dispersions for the period 2000–2020 during the growing season (winter, spring, summer and autumn)

которое даёт представление о фенологических событиях.

Использование процедуры STA позволило обнаружить, что наиболее характерными областями динамики дисперсий NDVI является Северное полушарие (рис. 4). Значимые дисперсии NDVI отмечены весной и осенью в биомах тайги, тундры, широколиственных лесах, в пастбищных и кустарниковых районах, а также и в антропогенно преобразованных районах (пахотные земли). В биоме вечнозелёных тропических лесов сезонные изменения значений дисперсии NDVI незначительны. В статье [23] авторы выявили незначительные изменения сезонной динамики растительности (появление листьев, старение листьев и опадение листьев), что согласуется с нашими данными.

Более половины (56,30%) биомов суши демонстрируют значительные сезонные тренды NDVI, из них почти половина (46,10%) значимых трендов принадлежит биомам тайги, тундры, широколиственным лесам и антропогенно преобразованным районам (пахотные земли) [22]. По сравнению с наземными исследованиями спутниковое дистанционное зондирование на основе метода скользящего окна дисперсии NDVI даёт возможность оценивать фенологию растительности в глобальном масштабе с высокой временной частотой. Данные космической съёмки являются объективными, они охватывают значительные площади, имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими методами [24].

Заключение

На основе многолетних спутниковых данных и метода скользящей дисперсии NDVI определены границы биомов во всех природно-климатических зонах Земли. Созданы растровые карты многолетней динамики дисперсий временных рядов NDVI.

Дисперсии NDVI биомов (зон с определённым типом растительности) имеют низкие значения, в то время как дисперсии NDVI экотонов (переходных зон между биомами) – высокие значения. Выявлено совпадение биомов на векторных биологических картах и растровых картах распределения дисперсий NDVI, показывающих границы биомов.

Предложенный метод использует спутниковую информацию, позволяющую вести мониторинг в глобальном масштабе с высокой повторяемостью. Такой подход позволяет всегда получать актуальную информацию о состоянии, аномалиях и трендах раститель-

ного покрова биосферы Земли. Это открывает большие возможности для получения фундаментальных знаний о функционировании биосферы – её ответ на глобальное потепление, движение границ вечной мерзлоты, глобальный газообмен и т. д. Также возможно и практическое применение метода при обнаружении аномалий динамики биомов, планировании хозяйственного развития регионов с учётом трендов и направлений динамики экотонов (границ разделов известных биомов).

Результаты анализа пространственного распределения дисперсий NDVI на растровых картах за период 2000–2020 гг. в течение вегетационного сезона (зима, весна, лето и осень) дают возможность оценивать фенологические события в глобальном масштабе.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0018).

Литература

1. Одум Ю. Основы экологии. Москва: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
2. Nelson E., Kareiva P., Ruckelshaus M., Arkema K., Geller G., Girvetz E., Goodrich D., Matzek V., Pinsky M., Reid W., Saunders M., Semmens D., Tallis H. Climate change's impact on key ecosystem services and the human well-being they support in the US // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. No. 9. P. 483–493. doi: 10.1890/120312
3. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Динамика растительности северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // *Арктика XXI век. Естественные науки*. 2015. № 2. С. 48–59.
4. Feeley K.J., Silman M.R., Bush M.B., Farfan W., Cabrera K.G., Malhi Ya., Meir P., Revilla N.S., Quisipanqui M.N.R., Saatchi S. Upslope migration of Andean trees // *Journal of Biogeography*. 2011. V. 38. No. 4. P. 783–791. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x
5. Буренина Т.А., Назимова Д.И. Географические исследования лесов Сибири // *География и природные ресурсы*. 2007. № 3. С. 165–172.
6. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съёмки // *География и природные ресурсы*. 2011. № 1. С. 67–73.
7. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
8. Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to veg-

etation shifts due to climate change // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. No. 6. P. 755–768. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x

9. Morin X., Thuiller W. Comparing niche and process based model store duce prediction un certainty in species range shifts under climate change // *Ecology*. 2009. V. 90. P. 1301–1313. doi: 10.1890/08-0134.1

10. Остроухов А.В. Оценка динамики антропогенной трансформации темных лесов северного Сихотэ-Алиня на основе дистанционного зондирования // *География и природные ресурсы*. 2014. № 1. С. 155–160.

11. Хромых В.В., Хромых О.В. Использование ГИС-технологий для изучения динамики долинных ландшафтов (на примере долины Нижней Томи) // *Вестник Томского государственного университета*. 2007. № 300. С. 230–233.

12. Васильев А.В. Комплексный экологический мониторинг негативного воздействия нефтесодержащих отходов в районах нефтяных месторождений как объекта экологического риска // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 4. С. 78–84. doi: 10.25750/1995-4304-2023-4-078-084

13. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. P. 481–486. doi: 10.1109/36.377948

14. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the world ocean as observed satellite data // *Advances in Space Research*. 1996. V. 18. No. 7. P. 129–132.

15. Erdős L., Bátori Z., Tölgyesi C.S., Kórmöczi L. The moving split window (msw) analysis in vegetation science – an overview // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2014. V. 12. No. 3. P. 787–805. doi: 10.15666/aeer/1203_787805

16. Kormoczi L., Batori Z., Erdos L., Tolgyesi Cs., Zalatnai M. The role of randomization tests in vegetation boundary detection with moving split-window analysis // *Journal of Vegetation Science*. 2016. V. 27. No. 6. P. 1288–1296. doi: 10.1111/jvs.12439

17. Шевырногов А.П., Ларько А.А., Высоцкая Г.С., Сомова Л.А. Определение границ биомов на территории Евразии по динамике дисперсии NDVI на основе спутникового мониторинга // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 1. С. 123–128.

18. Holdridge L.R. The determination of atmospheric water movements // *Ecology*. 1962. V. 43. No. 1. P. 1–9. doi: 10.2307/1932033

19. Giri C., Zhub Z., Reed B. Comparative analyses of the Global Land Cover 2000 and MODIS land covers data sets // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 123–132. doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005

20. Overland J.E., Wang M.Y., Bond N.A. Recent temperature changes in the Western Arctic during spring // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. P. 1702–1716.

doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1702:RTCITW>2.0.CO;2

21. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecol*. 2009. V. 90. No. 10. P. 2657–2663. doi: 10.1890/09-0102.1

22. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. V. 5 (10). P. 4799–4818. doi: 10.3390/rs5104799

23. Xiao X., Zhang Q., Saleska S., Hutrya L., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 105–122. doi: 10.1016/j.rse.2004.08.015

24. Ашихмина Т.Я., Рутман В.В., Адамович Т.А., Товстик Е.В. Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi* на урбанизированных территориях по данным дистанционного зондирования Земли // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 3. С. 73–80. doi: 10.25750/1995-4304-2023-3-073-080

References

1. Odum Yu. *Fundamentals of Ecology*. Moskva: Mir, 1986. V. 1. 328 p. (in Russian).

2. Nelson E., Kareiva P., Ruckelshaus M., Arkema K., Geller G., Girvetz E., Goodrich D., Matzek V., Pinsky M., Reid W., Saunders M., Semmens D., Tallis H. Climate change's impact on key ecosystem services and the human well-being they support in the US // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. No. 9. P. 483–493. doi: 10.1890/120312

3. Zhiltsova E.L., Anisimov O.A. Vegetation dynamics in northern Eurasia: an analysis of modern observations and a forecast for the 21st century // *Arktika XXI vek. Yestestvennyye nauki*. 2015. No. 2. P. 48–59 (in Russian).

4. Feeley K.J., Silman M.R., Bush M.B., Farfan W., Cabrera K.G., Malhi Ya., Meir P., Revilla N.S., Quisiquyanqui M.N.R., Saatchi S. Upslope migration of Andean trees // *Journal of Biogeography*. 2011. V. 38. No. 4. P. 783–791. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x

5. Burenina T.A., Nazimova D.I. Geographical research of Siberian forests // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2007. No. 3. P. 165–172 (in Russian).

6. Kornienko S.G. Assessment of transformations of the natural landscapes of the Taz Peninsula according to satellite imagery // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2011. No. 1. P. 67–73 (in Russian).

7. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

8. Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. No. 6. P. 755–768. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x
9. Morin X., Thuiller W. Comparing niche and process based model store duce prediction un certainty in species range shifts under climate change // *Ecology*. 2009. V. 90. P. 1301–1313. doi: 10.1890/08-0134.1
10. Ostroukhov A.V. Evaluation of the dynamics of anthropogenic transformation of dark coniferous forests of northern Sikhote-Alin on the basis of remote sensing // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2014. No. 1. P. 155–160 (in Russian).
11. Khromykh V.V., Khromykh O.V. The use of GIS technology to study the dynamics of valley landscapes (on the example of the Lower Tom Valley) // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007. No. 300. P. 230–233 (in Russian).
12. Vasilyev A.V. Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 78–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-078-084
13. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. P. 481–486. doi: 10.1109/36.377948
14. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the world ocean as observed satellite data // *Advances in Space Research*. 1996. V. 18. No. 7. P. 129–132.
15. Erdős L., Bátor Z., Tölgyesi C.S., Kőrmőczi L. The moving split window (msw) analysis in vegetation science – an overview // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2014. V. 12. No. 3. P. 787–805. doi: 10.15666/aeer/1203_787805
16. Kormoczi L., Batori Z., Erdos L., Tolgyesi Cs., Zalattnai M. The role of randomization tests in vegetation boundary detection with moving split-window analysis // *Journal of Vegetation Science*. 2016. V. 27. No. 6. P. 1288–1296. doi: 10.1111/jvs.12439
17. Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Vysotskaya G.S., Somova L.A. Determining the boundaries of biomes in Eurasia by the dynamics of NDVI dispersion based on satellite monitoring // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2019. No. 1. P. 123–128 (in Russian).
18. Holdridge L.R. The determination of atmospheric water movements // *Ecology*. 1962. V. 43. No. 1. P. 1–9. doi: 10.2307/1932033
19. Giri C., Zhub Z., Reed B. Comparative analyses of the Global Land Cover 2000 and MODIS land covers data sets // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 123–132. doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005
20. Overland J.E., Wang M.Y., Bond N.A. Recent temperature changes in the Western Arctic during spring // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. P. 1702–1716. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1702:RTCITW>2.0.CO;2
21. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecol*. 2009. V. 90. No. 10. P. 2657–2663. doi: 10.1890/09-0102.1
22. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. V. 5 (10). P. 4799–4818. doi: 10.3390/rs5104799
23. Xiao X., Zhang Q., Saleska S., Hutyrá L., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 105–122. doi: 10.1016/j.rse.2004.08.015
24. Ashikhmina T.Ya., Rutman V.V., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi* in urban areas based on Earth remote sensing data // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 73–80 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-073-080

Сравнительная экологическая оценка техногенного воздействия на воздушный бассейн территории Кировской области

© 2024. Т. Э. Абашев¹, министр,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
М. Х. Хето², аспирант,

¹Министерство охраны окружающей среды Кировской области,
610002, Россия, г. Киров, ул. Красноармейская, д. 17,

²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

По материалам федерального и региональных докладов о состоянии окружающей среды, данным контроля и мониторинга Министерства охраны окружающей среды Кировской области, результатам научных исследований состояния атмосферного воздуха сделан анализ и проведена сравнительная оценка состояния атмосферного воздуха на примере территории Кировской области, входящей в состав Приволжского федерального округа (ПФО). Отмечены основные источники выбросов в воздушную среду и их количественные характеристики. Несмотря на то, что за последние годы парк автомобильного транспорта существенно увеличился, основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в регионах ПФО пока являются выбросы от стационарных источников, а на территориях ряда городских агломераций они уступают передвижным источникам загрязнения. Подтверждением этого являются результаты рейтинга регионов ПФО по совокупному объёму выбросов в атмосферный воздух от всех источников загрязнения за период с 2019 по 2023 гг. Наибольшие количественные показатели выброса загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух отмечаются в течение всего периода в регионах, где развита и действует химическая, нефтехимическая, горнорудная промышленность, машиностроение. Это, прежде всего, касается Республики Башкортостан, Пермского края, Оренбургской области и Республики Татарстан. В то время как Чувашская и Мордовская республики, Республика Марий Эл, Пензенская, Ульяновская, Кировская области в данном рейтинге характеризуются значительно меньшим вкладом выбросов ЗВ в атмосферу и устойчиво занимают по данным показателям лидирующее положение. Территория Кировской области в течение ряда лет характеризуется по совокупному объёму выбросов в атмосферный воздух устойчиво на 6 месте. Результаты экологического контроля и мониторинга, проведённых научных исследований свидетельствуют о том, что основная техногенная нагрузка на атмосферный воздух в Кировской области приходится на областной центр – г. Киров и промышленно-развитые районы региона: Кирово-Чепецкий, Вятско-Полянский, Омутнинский, Слободской районы. В каждом из них выявляются территории с локальными участками загрязнения.

Ключевые слова: атмосферный воздух, выбросы, источники техногенного воздействия, загрязняющие вещества, контроль и мониторинг, рейтинг регионов.

Ecological assessment of technogenic impact on the air basin of the Kirov region

© 2024. T. E. Abashev¹ ORCID: 0009-0002-5082-8909[†]

T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

M. H. Kheto² ORCID: 0009-0001-7138-4203[†]

¹Ministry of Environmental Protection of the Kirov Region,
17, Krasnoarmeyskaya St., Kirov, Russia, 610002,

²Vyatka State University,

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

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: ecolab2@gmail.com

The materials of federal and regional reports on the state of the environment, and control and monitoring data of the Ministry of Environmental Protection of the Kirov region, as well as on the results of scientific studies of the atmospheric air state were analyzed. Based on the analysis the comparative assessment of the atmospheric air state was carried out using the example of the Kirov Region territory as part of the Volga Federal District. The main sources of air emissions and their quantitative characteristics are noted. Despite the fact that recently the vehicle fleet has increased significantly, the stationary sources of air pollution are the main in the regions of the Volga Federal District. In a number of urban agglomerations emissions from stationary sources are inferior to mobile sources of pollution. This is confirmed by the results of the rating of the Volga Federal District regions by the total volume of atmospheric emissions from all sources of pollution for the period from 2019 to 2023. The highest quantity of air pollutant emissions is observed throughout the entire period in regions with high developed chemical, petrochemical, mining, and mechanical engineering industries. This primarily concerns the Republic of Bashkortostan, the Perm Territory, the Orenburg region and the Republic of Tatarstan. While the Chuvash and Mordovian Republics, the Republic of Mari El, the Penza, Ulyanovsk, and Kirov regions are characterized by a significantly smaller contribution of air pollutant emissions and consistently occupy a leading position in these indicators. For a number of years, the territory of the Kirov region has been consistently ranked 6th in terms of total atmospheric emissions. The results of environmental control and monitoring, and conducted scientific research indicate that the main technogenic load on the atmospheric air in the Kirov region falls on the regional center – the city of Kirov and industrially developed areas of the region: Kirovo-Chepetsky, Vyatsko-Polyansky, Omutninsky, Belokholunitsky districts. Areas with local areas of contamination are identified in each of the above.

Keywords: atmospheric air, emissions, sources of technogenic impact, pollutants, control and monitoring, rating of regions.

Проблема загазованности воздушного бассейна характерна для всех регионов России и, в особенности, для территории городов областного значения, крупных промышленных центров. Наиболее значительные превышения санитарно-гигиенических норм при выбросах в окружающую среду (ОС) в данных агломерациях создаются промышленными предприятиями и автомобильным транспортом. Больше всего загрязняют атмосферу добыча нефти, угля и других энергоносителей (четверть от всего объема выбросов), работа металлургических и химических производств, целлюлозно-бумажных комбинатов, транспортные предприятия и трубопроводы, услуги в области добычи полезных ископаемых, деятельность в сфере животноводства [1, 2].

По данным Федеральной службы государственной статистики [3], в 2022 г. на территории России около трети (30%, или 5,2 млн т) загрязняющих атмосферу промышленных выбросов приходилось на монооксид углерода, равные крупные доли в общих выбросах занимают углеводороды (в основном метан) и диоксид серы (по 20%, или по 3,4 млн т), на диоксид азота приходится (11%, или 2 млн т), органические соединения 8%, или 1,4 млн т (за исключением летучих органических соединений (ЛОС), к этой группе относятся этилен, бензол, ксилол, толуол, ацетон, бензин, керосин и др.). Твёрдые вещества в структуре загрязнений составляют 10%, или 1,7 млн т – в воздух выбрасываются соединения железа, марганца, никеля, хрома, свинца, мазутная зола, пыль (на неё приходится более трети от всей массы выброшенных в воздух твёрдых веществ), а также сажа (одна

шестая массы твёрдых веществ). На прочие газообразные и жидкие вещества приходится 1%, или 0,2 млн т вредных выбросов [3]. Все эти вещества имеют разный уровень опасности: от сравнительно безопасных до очень опасных. К примеру, монооксид углерода и метан относятся к IV, малоопасному классу, а диоксид серы и диоксид азота причисляют к более опасному III классу. Среди наиболее опасных специфических веществ, входящих в состав выбросов, о которых предприятия обязаны отчитываться отдельно, в 2022 г. рост продемонстрировали бенз(а)пирен +81,4% (I класс опасности); никель и его соединения +23,6% (II класс); хлор +13,4% (II класс); свинец +13,2% (I класс); хлороводород +8,6% (II класс); оксид кальция +7,3% (II класс); формальдегид +5% (II класс); неорганическая пыль +3,8% (III класс); мышьяк +1,3% (II класс) и толуол +0,8% (III класс).

В пересчёте на одного жителя больше всего загрязняющих веществ (ЗВ) фиксируется в Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах – по 2 и 1,9 т на душу населения, соответственно, а также в Красноярском крае, Ханты-Мансийском автономном округе (АО), Кемеровской области, Республике Коми, Магаданской области, Чукотском АО, Якутии, Иркутской области. Наименьшее количество вредных веществ приходится в среднем на одного жителя Дагестана (17,2 кг), Кабардино-Балкарии (21,6 кг) и Севастополя (28,3 кг), а также Москвы, Тувы, Санкт-Петербурга, Чувашии, Ульяновской области, Пензенской области, Северной Осетии [1–3].

В 2022 г., согласно индекса качества воздуха – IQAir, Россия заняла 86-е место из

131 в рейтинге стран с самым загрязнённым воздухом. Данный индекс используется во всех мировых экологических государственных органах для информирования общественности про уровень загрязнения воздуха, а также прогнозирования загрязнения атмосферы. Концентрация взвешенных твёрдых микрочастиц и мельчайших капелек жидкости в 2,2 раза выше рекомендуемого ВОЗ среднегодового значения качества воздуха.

Данная тенденция по ЗВ характерна и для регионов Приволжского федерального округа (ПФО). В 2022 г. в ряде регионов ПФО зафиксирован относительный прирост числа предприятий-загрязнителей атмосферного воздуха, это в первую очередь относится к Самарской области (+52,7%), Нижегородской области (+46,3%), Пермскому краю (+46,2%), Оренбургской области (+42,4%), Республике Татарстан (+38,1%) и Пензенской области (+34,5%) [3].

Целью работы явились анализ и оценка техногенного воздействия на воздушный бассейн территории Кировской области по источникам воздействия, выявление приоритетных загрязняющих веществ для разработки программы экологического мониторинга и мероприятий по улучшению качества атмосферного воздуха на территории региона.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является обзор и анализ данных о техногенном воздействии источников загрязнения на воздушный бассейн территории Кировской области в сравнении с другими регионами ПФО.

Кировская область входит в ПФО и граничит с Нижегородской, Костромской, Вологодской, Архангельской областями и Пермским краем, республиками Коми, Татарстан, Марий Эл и Удмуртия. Территория Кировской области – 120,4 тыс. км², общая численность населения на 01.01.2023 составила 1143,6 тыс. чел. Удельный вес городского населения – 78,1%, сельского – 21,9%. Индустриально-промышленными центрами региона являются города Киров, Кирово-Чепецк, Вятские Поляны, Котельнич, Омутнинск, Слободской [4, 5].

При проведении исследований по данной теме использовались: литературные источники, материалы федеральных и региональных докладов о состоянии и загрязнении окружающей природной среды за период с 2006 по 2023 гг., данные контроля и мониторинга

Министерства охраны окружающей среды Кировской области, а также результаты проведённых исследований по оценке состояния атмосферного воздуха на территории г. Кирова.

Результаты и обсуждение

Приволжский федеральный округ – один из наиболее развитых промышленных и сельскохозяйственных регионов России. В него входит 14 регионов, из них 6 республик, один край и 7 областей. Все они существенно различаются: как по климатическим условиям, по площади, по количеству проживающего населения, наличию крупных городов, развитию инфраструктуры, так и по состоянию окружающей природной среды, в том числе атмосферного воздуха.

За анализируемый период с 2006 по 2023 гг. уровень загрязнённости атмосферного воздуха на территории ПФО значительно снизился, однако по регионам и крупным городам в этом направлении всё ещё проявляются существенные различия. Наибольшее количество от источников загрязнения выбрасывается в атмосферу по разным регионам ПФО и годам жидких и газообразных веществ от 25 до 450 тыс. т в год, в то время как твёрдых веществ выбрасывается на порядок меньше – от 1,5 до 20 тыс. т в год. В состав данных поллютантов входят общепромышленные ЗВ – оксиды углерода, серы, азота, взвешенные вещества, сажа, углеводороды, и специфические ЗВ – хлороводород, фтороводород, сероводород, формальдегид, аммиак, фенол, сероуглерод, этилбензол, бенз(а)пирен, соединения свинца, ртути и др. [1–3].

Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха от стационарных источников вносят обрабатывающие производства и предприятия электроэнергетики. В ряде регионов, особенно в городах, где население составляет 1 млн и более человек, наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят транспортные средства [1]. В таблице 1 и на рисунке 1 представлены сравнительные данные по объёму выбросов ЗВ от стационарных источников в атмосферный воздух по регионам ПФО за период 2019, 2021–2023 гг.

Сравнительный анализ данных, представленных в таблице 1 и на рисунке 1, свидетельствует о значительном различии регионов ПФО по количеству выбросов ЗВ в атмосферный воздух. Наибольший выброс ЗВ в атмосферный воздух обеспечивается в этот период в регионах: Республика Башкортостан,

Таблица 1 / Table 1

Динамика выбросов ЗВ в атмосферный воздух от стационарных источников по регионам ПФО, т / Dynamics of air pollutant emissions from stationary sources by regions of the Volga Federal District, tons

Федеральный округ / Federal District	2019	2021	2022	2023
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	452019	449323	432541	446712
Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	278435	322545	319852	319761
Пермский край / Perm region	205346	275154	274579	285682
Саратовская область / Saratov region	204541	117350	118099	137957
Оренбургская область / Orenburg region	195177	433368	397874	365684
Удмуртская Республика / Udmurt republic	184879	145032	154579	148022
Самарская область / Samara Region	170533	235403	233955	221743
Нижегородская область / Nizhny Novgorod region	143191	123490	121532	129451
Кировская область / Kirov region	82698	88599	85738	88736
Республика Мордовия / Republic of Mordovia	50741	53304	49872	57649
Республика Марий Эл / Mari El Republic	36676	38709	32699	44411
Пензенская область / Penza region	25442	28887	30920	37944
Чувашская Республика / Chuvash Republic	35004	27086	31622	26222
Ульяновская область / Ulyanovsk region	9606	30809	25033	26661

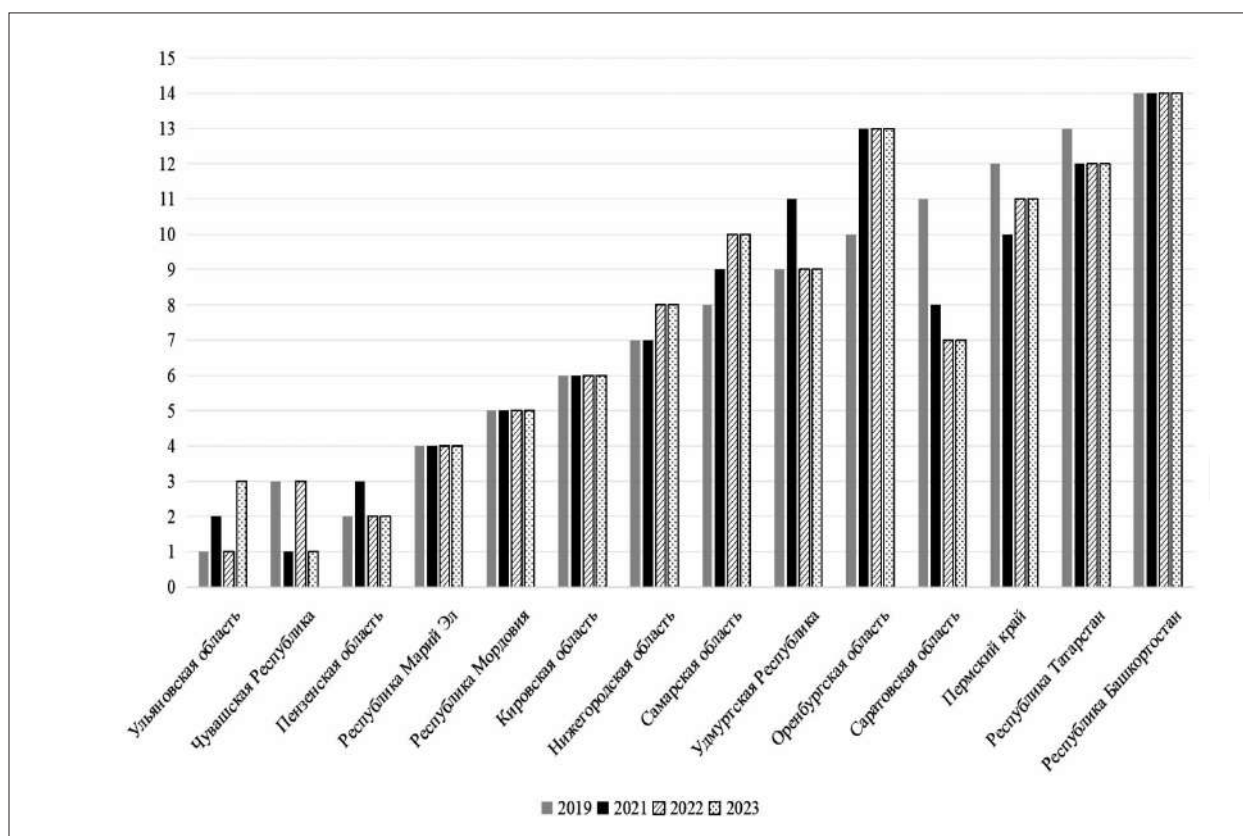


Рис. 1. Сравнительные данные по уровням выбросов ЗВ в атмосферный воздух от стационарных источников по регионам ПФО за период 2019, 2021–2023 гг. (по вертикальной оси 1-й уровень соответствует 9606 тыс. т, 14-й уровень – 452019 тыс. т)

Fig. 1. Comparative data on the levels of air pollutant emissions from stationary sources in the regions of the Volga Federal District for the period 2019, 2021–2023 (on the vertical axis the 1st level corresponds to 9606 thousand tons, the 14th level – 452019 thousand tons)

Таблица 2 / Table 2

Рейтинг (место среди регионов ПФО по количеству выбросов в атмосферу)
Rating (place among the Volga Federal District regions in terms of the amount of air emissions)

Регионы ПФО Volga Federal District regions	2019	2021	2022	2023
	Рейтинг / Rating			
Ульяновская область / Ulyanovsk region	1	2	1	3
Пензенская область / Penza region	2	3	2	2
Чувашская Республика / Chuvash Republic	3	1	3	1
Республика Марий Эл / Mari El Republic	4	4	4	4
Республика Мордовия / Republic of Mordovia	5	5	5	5
Кировская область / Kirov region	6	6	6	6
Нижегородская область / Nizhny Novgorod Region	7	7	8	8
Самарская область / Samara Region	8	9	10	10
Удмуртская Республика / Udmurt republic	9	11	9	9
Пермский край / Perm region	12	10	11	11
Саратовская область / Saratov region	11	8	7	7
Оренбургская область / Orenburg region	10	13	13	13
Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	13	12	12	12
Республика Башкортостан / Republic of Bashkortostan	14	14	14	14

Республика Татарстан, Оренбургская область, Пермский край, в то время как значительно меньший выброс ЗВ характерен для Ульяновской и Пензенской области, Чувашской Республики и Республики Марий Эл.

Кировская область по объёму выбросов среди 14 регионов ПФО устойчиво занимает 6 место (табл. 2). При этом следует отметить, что и для других регионов количество выбросов ЗВ в атмосферный воздух по годам отличается незначительно. Так, например, в Республике Башкортостан выброс ЗВ в атмосферный воздух за период 2019, 2021–2023 гг. колеблется в объёмах от 432 до 452 тыс. т в год, в Ульяновской области – от 9,8 до 30,5 тыс. т, в Кировской области – от 82 до 88 тыс. т в год (табл. 1).

В перечень городов Российской Федерации, в которых были зарегистрированы случаи превышения ПДК максимальными концентрациями отдельных ЗВ более чем в 10 раз, в 2022 г. из ПФО отнесены два города: г. Уфа по бенз(а)пирену и г. Самара – по сероводороду.

В 2022 г. список городов с оценкой степени загрязнения атмосферного воздуха, соответствующей значению $I_{ЗА} \geq 14$ (индекс атмосферного загрязнения), включал 40 городов РФ. Основной вклад в оценку степени загрязнения в городах со значением $I_{ЗА} \geq 14$ вносит бенз(а)пирен, в наибольших количествах поступающий в атмосферный воздух в результате сжигания твёрдого топлива, так как основными источниками его вы-

бросов являются предприятия топливно-энергетического комплекса. В некоторых городах это предприятия чёрной и цветной металлургии, алюминиевой, химической, лесной и деревообрабатывающей промышленности. По ПФО только г. Пенза входит в перечень городов со значением $I_{ЗА} \geq 14$, но по другим ЗВ, а именно, по наибольшему содержанию в воздухе хлороводорода, формальдегида, диоксида азота, фенола и сероводорода [1–3].

Степень загрязнения атмосферного воздуха, соответствующая значению $I_{ЗА} > 7$, отмечалась в 2022 г. в городах ПФО из Самарской и Ульяновской областей и в Чувашской Республике. Средняя за год концентрация одного или нескольких веществ, превысивших ПДК ($Q > 1$ ПДК), отмечена в ПФО в 5-ти городах республики Башкортостан, Нижегородской и Оренбургской областей, в 7-ми городах Ульяновской области и в 9-ти – в Самарской области.

Кировская область по данным показателям не входит не в один из перечней, где отмечаются превышения ЗВ выше ПДК и равным или более значений $I_{ЗА} > 7$, в то время как на территории Кировской области размещён, действует и состоит на учёте 8251 объект негативного воздействия на ОС. Государственный экологический надзор осуществляется по линии Министерства охраны ОС Кировской области на 5604 объектах, а по линии Управления Росприроднадзора по Кировской области – на 2647 объектах [4, 5]. Из них объектов негативного воздействия (ОН-

ВОС) и стационарных источников выбросов в Кировской области, относящихся к:

1 категории – 21 (все относятся к Управлению Росприроднадзора),

2 категории – 624, из них: 188 – относятся к Министерству охраны ОС, 436 – к Управлению Росприроднадзора,

3 категории – 4356, из них: 3568 – к Министерству охраны ОС, 788 – к Управлению Росприроднадзора,

4 категории – 3250, из них: 1848 – к Министерству охраны ОС, 1402 – к Управлению Росприроднадзора.

Основными ЗВ, выбрасываемыми в атмосферу на территории Кировской и Оренбургской областей, в Удмуртской Республике, являются оксид углерода, углеводороды (в том числе ЛОС), оксиды азота и серы. Во всех других регионах ПФО на первом месте находятся углеводороды, затем оксиды углерода, серы и азота [4, 5].

Большая часть выбросов от стационарных источников в Кировской области – это неспецифические (общепромышленные) выбросы (оксид углерода, углеводороды, диоксид серы, оксиды азота). Например, в 2022 г. состав общей массы выбросов ЗВ от стационарных источников составил: твёрдые отходы – 15,30 тыс. т, газообразные и жидкие –

70,43 тыс. т, в том числе по составу в них содержалось, тыс. т: оксида углерода – 35,08; углеводородов (без ЛОС) – 16,78; оксида азота – 10,35; диоксида серы – 3,20; ЛОС – 2,77; прочих веществ – 2,22.

Важной проблемой экологического состояния крупных городов региона является загрязнение ОС выбросами автомобильного транспорта. В 2022 г. в Кировской области выбросы от автотранспорта составили 89,048 тыс. т. Это на 4,881 тыс. т больше по сравнению с 2023 г. В общем объёме выбросов выбросы от автотранспорта составили в 2022 г. 50,9%. По данным Управления ГИБДД УМВД России по Кировской области, на 1 января 2023 г. в Кировской области на учёте в Госавтоинспекции состояло 509930 (в 2021 г. – 511924) единиц транспортных средств (рис. 2), из них 2465 (в 2021 г. – 2390) единиц транспортных средств оборудованы для питания двигателя газообразным топливом (компримированный природный газ – 609 (в 2021 г. – 520), сжиженный природный газ – 1856 (в 2021 г. – 1870) [4, 5].

Представленные на рисунке 2 данные свидетельствуют о том, что за 12 последних лет автомобильный парк в Кировской области существенно увеличился, почти в 1,5 раза, с 323470 машин в 2010 г. до 509930 в 2023 г.

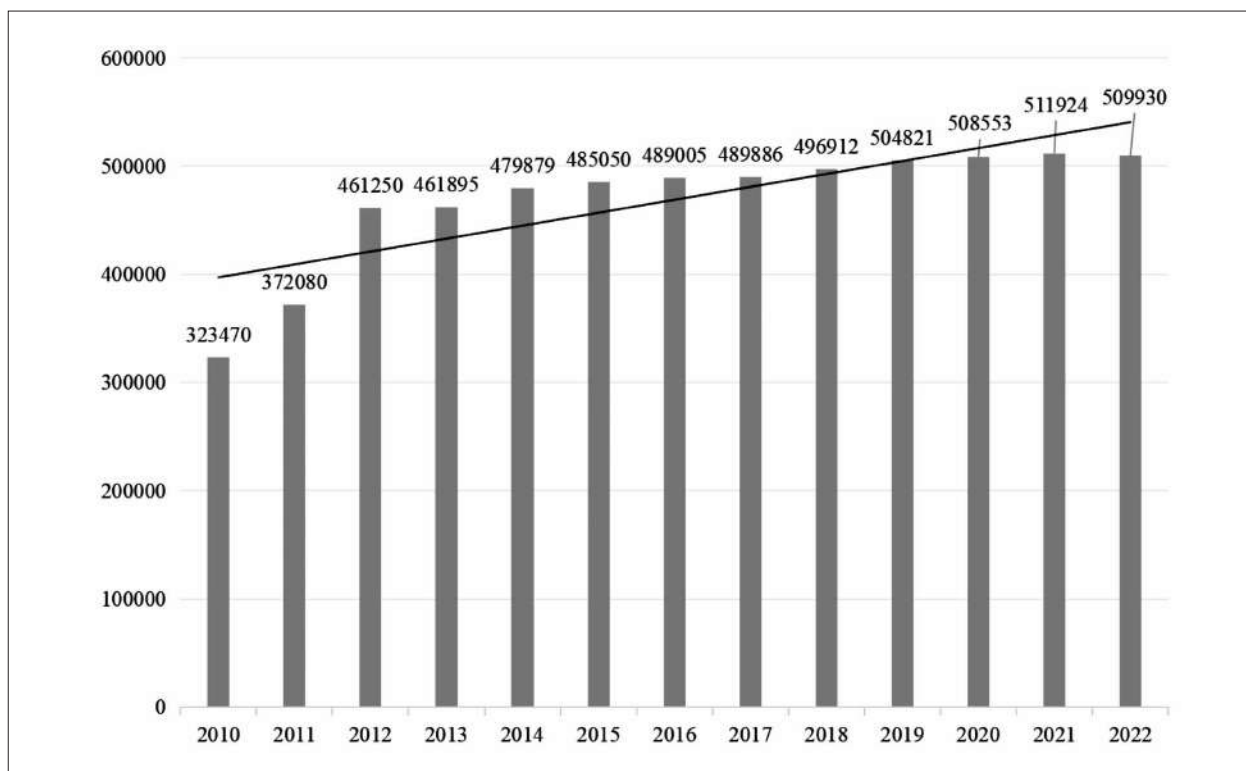


Рис. 2. Динамика роста количества автотранспорта в Кировской области за период 2010–2022 гг., ед. / Fig. 2. Dynamics of growth in the number of vehicles in the Kirov region for the period 2010–2022, units

Таблица 3 / Table 3

Динамика общих выбросов в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников на территории Кировской области / Dynamics of total air emissions from stationary and mobile sources in the Kirov region

Год Year	Совокупный объём выбросов, тыс. т Cumulative volume of emissions, thousand tons	Выброс от стационарных источников, тыс. т Emission from stationary sources, thousand tons	Выброс от передвижных источников, тыс. т Emission from mobile sources, thousand tons
2006	287,117	116,167	170,95
2007	269,154	108,999	160,155
2008	266,670	98,141	168,53
2009	269,668	117,320	152,348
2010	257,115	104,325	152,79
2011	217,219	100,103	117,116
2012	204,241	101,341	102,90
2013	215,300	103,300	112,00
2014	228,308	114,908	113,40
2015	209,890	96,093	113,80
2016	214,786	98,686	116,10
2017	208,681	98,081	110,60
2018	208,562	94,281	114,281
2019	179,508	82,698	96,81
2020	179,012	85,142	93,87
2021	176,310	88,600	87,710
2022	174,786	85,738	89,048
2023	172,900	88,736	84,167

и стабилизировался практически с 2020 г. По линии УГИБДД УМВД России по Кировской области обеспечивается контроль выбросов общественного транспорта.

Сравнительная характеристика совокупного объёма выбросов ЗВ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников на территории Кировской области за период с 2006 по 2023 гг. представлена в таблице 3. Анализ данных таблицы 3 позволяет сделать вывод о том, что наметилась устойчивая тенденция снижения совокупного объёма выбросов ЗВ в атмосферный воздух с 287 до 172,9 тыс. т в год. В 2022 г. от предприятий и автотранспорта Кировской области в атмосферу поступило на 1,836 тыс. т больше, чем в 2023 г., т. е. 174,786 тыс. т ЗВ. По данным Западно-Уральского межрегионального управления Росприроднадзора, в 2022 г. всего поступило на очистные сооружения 110,126 тыс. т ЗВ. Из поступивших на очистку уловлено 102,448 тыс. т, утилизировано – 35,466 тыс. т, выбрасывается без очистки – 82,206 тыс. т (47%).

Важным показателем для оценки качества воздуха и тенденций его изменений является количество городов, где средние за год концентрации какого-либо ЗВ превышали 1 ПДК [1–3].

По сравнению с предыдущим годом, количество таких городов по России уменьшилось на 6 и составило 205, что связано со снижением запылённости воздуха в ряде городов. В 205 городах РФ средняя за год концентрация одного или нескольких ЗВ превысила ПДК ($Q > 1$ ПДК). В республиках Башкортостан и Крым, в Свердловской, Нижегородской, Оренбургской областях данный показатель отмечен в 5-ти городах, в Астраханской области – 6, в Красноярском крае (и Таймырском АО), Ханты-Мансийском АО (Югра), Ульяновской области – в каждом по 7, в Московской (и г. Москва) и Самарской областях – 9, в Ростовской области – 11, в Иркутской области – 16 городах. Количество городов в ПФО, где средние за год концентрации взвешенных веществ превысили норматив содержания ЗВ в атмосферном воздухе, по сравнению с 2021 г. уменьшилось на 6 городов и составило 114, формальдегида – на 2 города и составило 149. Количество городов, где средние за год концентрации диоксида азота превышали норматив содержания в атмосферном воздухе, за 5 лет уменьшилось на 12 городов, бенз(а)-пирена – уменьшилось на 8 [3].

По Кировской области в 2022 г. при проведении исследований в рамках государствен-

ного надзора и производственного контроля в атмосферном воздухе зарегистрированы превышения гигиенических нормативов по содержанию аммиака, сероводорода, оксида азота, оксида углерода, однако не было зарегистрировано уровней загрязнения атмосферного воздуха более 5 ПДК [4, 5]. Города с высоким и очень высоким значением ИЗА в регионе отсутствуют. Индекс загрязнения атмосферы двух крупных промышленных городов, г. Кирова и г. Кирово-Чепецка, оценивался в течение ряда лет на уровне ИЗА=4. В настоящее время он составляет ИЗА=1, что свидетельствует о малом загрязнении атмосферного воздуха, так как значение ИЗА<5 уже свидетельствует о низком загрязнении атмосферы. Однако в регионе несколько лет отмечается локальное загрязнение атмосферного воздуха в юго-западном микрорайоне г. Кирова и в период аварийных выбросов на предприятиях г. Кирово-Чепецка.

По данным мониторинга и контроля, за период 2018–2022 гг. среднегодовые концентрации взвешенных веществ в выбросах в атмосферный воздух в регионе снизились на 19%, однако, по-прежнему превышают норматив ПДК_{с.р.}. Выбросы твёрдых веществ от стационарных источников увеличились на 11%. Среднегодовые концентрации диоксида серы за последние пять лет существенно не изменились, оксида углерода – снизились на 18%, диоксида азота – на 8%, оксида азота – на 9%, бенз(а)пирена – на 24%. В то же время выбросы от стационарных источников, вносящих наибольший вклад в формирование уровня загрязнения воздуха бенз(а)пиреном, за период 2018–2022 гг. увеличились существенно – на 31,9%. Следует также отметить, что среднегодовые концентрации формальдегида за пятилетний период увеличились на 4%, а количество выбросов формальдегида от стационарных источников за период 2018–2022 гг. увеличилось на 53%.

Таким образом, на территории региона наряду с общепромышленными ЗВ в выбросах в атмосферный воздух необходимо контролировать и проводить мониторинговые исследования по определению содержания в атмосферном воздухе и в атмосферных осадках бенз(а)пирена и формальдегида, выбросы которых в атмосферу увеличиваются. Наибольшую долю выбросов составляют продукты сгорания дизельного топлива: бенз(а)пирен и амины.

Мониторинг в Кировской области за состоянием атмосферного воздуха осуществля-

ется специалистами природоохранного центра при Министерстве охраны ОС Кировской области, Кировского центра по гидрометеорологии и мониторингу ОС, а также Управления «Роспотребнадзор» по Кировской области на селитебной территории наиболее крупных населённых пунктов по 20 утверждённым точкам маршрутных постов наблюдения в 7 крупных промышленных центрах региона [4, 5]. При исследовании атмосферного воздуха населённых пунктов Кировской области выявлено, что удельный вес неудовлетворительных результатов исследований в регионе ниже, чем в целом по РФ. В 2022 г. исследовано 13833 пробы атмосферного воздуха городских и сельских поселений (2021 г. – 14 868, 2020 г. – 13 811). Доля проб атмосферного воздуха, превышающих нормативы, в 2022 г. в Кировской области составила – 0,02% (2018 г. – 0,1%, а в РФ – 0,7%; 2019 г. – 0,3%, в РФ – 0,7%; 2020 г. – 0,1%, в РФ – 0,6%; 2021 г. – 0,1%, в РФ – 0,8%). Наибольшее количество в выбросах по результатам исследований приходится на такие ЗВ, как диоксид азота, оксид углерода, взвешенные вещества, диоксид серы, углеводороды (в том числе ароматические), аммиак. Превышения ПДК максимально-разовых доз регистрировались в городских поселениях при подфакельном отборе проб по оксиду азота (0,28%), сероводороду (0,12%), аммиаку (0,1%), оксиду углерода (0,06%). Исследования на содержание общепромышленных выбросов проводили на территории городов Кирова, Кирово-Чепецка, Вятских Полян, Слободского, Котельнича, Советска, а также в пос. Мирном Оричевского района. На территориях промышленных предприятий и автотранспорта (гг. Киров и Кирово-Чепецк) перечень исследуемых показателей более широкий в связи с наличием специфических загрязнителей. Так, в г. Кирове в программу мониторинговых исследований атмосферного воздуха на 2022 г. были включены фенол, формальдегид, аммиак и сероводород, в г. Кирово-Чепецке – хлороводород, фтороводород, аммиак, формальдегид, марганец. В ходе мониторинговых исследований атмосферного воздуха селитебной территории г. Кирова в 2014–2015 гг. регистрировались единичные случаи превышений гигиенических нормативов (по содержанию формальдегида), что являлось следствием загрязнения ОС выбросами автомобильного транспорта, а также по содержанию взвешенных веществ 2016 г. в г. Слободском. За 2021–2022 гг. превышений гигиенических нормативов при

проведении мониторинговых исследований на селитебной территории г. Кирова не выявлено.

Мониторинговые исследования по изучению состояния атмосферного воздуха в г. Кирове в 2021–2023 гг. проводятся в рамках научных исследований сотрудниками и аспирантами лаборатории биомониторинга Вятского государственного университета [6–9]. В ходе исследований в разное время суток в локальных местах и на транспортных магистралях города измерялось содержание в атмосферном воздухе пяти наиболее распространённых ЗВ: CH_4 , CO_2 , CO , H_2S , NH_3 . В ходе исследований ни по одному из определяемых газообразных веществ не было зафиксировано превышений значений ПДК среднесуточного содержания. Концентрация оксида углерода (II) в атмосферном воздухе в 2023 г., по сравнению с предыдущими годами, в основном, не изменилась и остаётся на всех исследуемых участках практически на прежнем уровне. Концентрация сероводорода в атмосферном воздухе городской среды колебалась от 0,002 до 0,008 мг/м³. Если в 2021–2022 гг. концентрация этого газа не превышала 0,004 мг/м³, то в октябре 2023 г., по сравнению с предыдущими годами, отмечены высокие концентрации данного ЗВ – до 0,007 мг/м³ на территории парка им. С.М. Кирова и до 0,008 мг/м³ на перекрёстке ул. Ленина и ул. Профсоюзной, что практически достигало значений ПДК. В то же время в июне на этих же участках отмечено снижение концентрации данного ЗВ.

Работы по регулированию выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) на территории Кировской области проводятся в соответствии с установленным порядком, утверждённым Постановлением Правительства Кировской области от 21.01.2021 № 21. Разработаны и согласованы планы мероприятий по регулированию выбросов при НМУ 18 предприятий. В результате анализа представленных отчётов установлено, что природопользователи выполняют мероприятия в соответствии с разработанными планами и законодательством РФ. Мероприятия по регулированию выбросов в периоды НМУ можно считать достаточно эффективными, поскольку по данным Кировского центра по гидрометеорологии и мониторингу ОС – филиала государственного бюджетного учреждения «Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Кировский ЦГМС –

филиал ФГБУ «Верхне-Волжское УГМС») в течение 2022 г. случаев высокого и экстремально высокого загрязнения атмосферного воздуха в пунктах наблюдательной сети Кировского ЦГМС, расположенных в г. Кирове (5 пунктов) и г. Кирово-Чепецке (1 пункт), не зарегистрировано [1].

Важной характеристикой состояния атмосферы являются факторы радиационного излучения. Радиационная обстановка в Кировской области в 2022 г. на территории области оставалась благополучной и по сравнению с предыдущими годами практически не изменилась. Радиационные аномалии отсутствовали, превышений основных дозовых пределов не зарегистрировано [10, 11]. Основным дозообразующим фактором радиационного воздействия является природное облучение человека. Средняя доза природного облучения в 2022 г. на федеральном уровне составила 3,34 мЗв, из которых 1,98 мЗв за счёт радона. Для 6 субъектов РФ средняя доза природного облучения в 2022 г. превысила 5 мЗв: в Республике Алтай – 8,54 мЗв, в Забайкальском крае – 8,14 мЗв, в Еврейской автономной области – 6,18 мЗв, в Республике Тыва – 5,69 мЗв, в Ставропольском крае – 5,47 мЗв и в Иркутской области – 5,24 мЗв [12]. В Кировской области природное облучение составило в 2017 г. – 82,5%, 2018 г. – 82,2%, 2019 г. – 80,4%, 2020 г. – 79,8%, 2021 г. – 68,8%, в 2022 г. – 70,58%. Средние годовые эффективные дозы природного облучения человека в Кировской области и по РФ за счёт внешнего гамма-излучения и за счёт радона представлены в таблице 4.

Анализ значений среднегодовой эффективной дозы природного облучения на одного человека по Кировской области за период 2017 по 2022 гг. (табл. 4) свидетельствует о том, что данный показатель значительно ниже, чем на территории РФ, кроме того, в регионе наметилась чёткая тенденция снижения эффективной дозы природного облучения по годам.

Средняя доза облучения населения РФ за счёт всех источников ионизирующего излучения в 2022 г. составила 4,21 мЗв. Наибольшие дозы имели место в Забайкальском крае (8,69 мЗв), в республиках Алтай (9,25 мЗв) и Тыва (6,30 мЗв), в Еврейской автономной области (6,44 мЗв), в Иркутской области (6,36 мЗв) и в Ставропольском крае (6,10 мЗв). В Кировской области средняя годовая эффективная доза на жителя за счёт всех источников ионизирующего излучения (ИИИ) составила

Таблица 4 / Table 4

Средние годовые эффективные дозы природного облучения (мЗв/год на человека)
Average annual effective doses of natural radiation

Год / Year	Кировская область Kirov region	Российская Федерация Russian Federation
2017	2,97	3,34
2018	2,48	3,26
2019	2,46	3,28
2020	2,24	3,20
2021	2,16	4,18
2022	2,04	3,34

Таблица 5 / Table 5

Средняя годовая эффективная доза на жителя за счёт всех ИИИ в Кировской области, мЗв/год
Average annual effective dose per inhabitant due to all radiation sources in the Kirov region, mSv/year

Территория Territory	Год / Year					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Кировская область Kirov region	3,6	3,0	3,1	3,0	3,1	2,892
Российская Федерация Russian Federation	3,9	3,8	3,9	4,0	4,2	4,21

в 2022 г. 2,892 мЗв/год (табл. 5) [11, 12]. Коллективная годовая эффективная доза облучения населения области за счёт всех ИИИ в 2022 г. составила 3570,49 чел.-Зв [11].

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что средняя годовая эффективная доза на жителя за счёт всех ИИИ как по стране, так и по Кировской области в течение ряда лет практически находится на одинаковом уровне. Для территории Кировской области это значение находится в пределах 2,9–3,6 мЗв/год, а по стране от 3,8 до 4,21 мЗв/год.

Значимым шагом в сторону достижения баланса выбросов ЗВ в атмосферу в России является федеральный проект «Чистый воздух» в составе национального проекта «Экология». В рамках данного проекта ставится задача – объём выбросов к 2030 г. должен снизиться вдвое. В данном эксперименте по квотированию вредных выбросов в атмосферу уже участвует 41 город России (12 из них – с 2019 г.) [13]. От Кировской области в данный эксперимент по наиболее загрязнённым городам в РФ не включён пока ни один город. Однако, если по результатам эксперимента данная задача будет поставлена перед всеми крупными городами и промышленными центрами, то за оставшиеся 6 лет по снижению вдвое показателя совокупного объёма выбросов ЗВ в атмосферный воздух в регионе предстоит многое сделать. В 2006 г. совокупный объём выбросов ЗВ

в атмосферный воздух составлял 287 тыс. т, потребуется его снизить до 143,5 тыс. т, а если будет взят показатель за последние 5 лет, то в 2019 г. совокупный объём выбросов ЗВ в атмосферный воздух в регионе составлял 179,5 тыс. т и довести его потребуется практически до 90 тыс. т. Безусловно, это не простая задача, и к её реализации всем предприятиям необходимо готовиться не откладывая.

Кроме того, нужно стремиться к постоянному снижению выбросов в атмосферный воздух парниковых газов от предприятий энергетики, промышленности, строительства, сельского хозяйства и не только по диоксиду углерода, метану, закиси азота, но и примесей к ним, специфическим ЗВ: формальдегиду, фторо- и хлороуглероду, гидрофторуглероду, перфторуглероду, гексафториду серы и др. [13–16]. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 14.03.2022 г. № 355 и Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.04.2022 г. № 707, выбросы парниковых газов от предприятий до 2025 г. не должны достигать границы 150000 т CO₂-экв в год, а с 2025 г. этот показатель планируется ужесточить до 50 т CO₂-экв в год. Если данный показатель на сегодня выше значения 150000 т CO₂-экв в год, то от предприятия требуется обязательное представление отчёта о выбросах парниковых газов в Министерство экономического развития Российской Федерации оператору реестра парниковых газов.

Заклучение

Анализ и оценка имеющихся данных и результаты мониторинговых исследований позволяют сделать вывод о том, что состояние атмосферного воздуха на территории Кировской области в сравнении с регионами ПФО и в целом по стране за период с 2006 г. стабилизировалось, и среди 14 регионов ПФО по качеству атмосферного воздуха Кировская область находится устойчиво на 6 месте.

Однако по снижению показателя совокупного объёма выбросов ЗВ в атмосферный воздух в регионе предстоит многое сделать: необходимо продолжать модернизировать промышленные предприятия и котельные, перевести их на экологичное топливо, запустить в больших объёмах оборудование личных и общественных транспортных средств для питания двигателей газообразным топливом, сжиженным природным газом. Предприятиям энергетики, промышленности, строительства, сельского хозяйства целесообразно провести анализ и расчёты прямых выбросов парниковых газов от производственной, косвенной деятельности и объёмов других прочих косвенных выбросов и стремиться внедрять в производство более современные экологичные технологии производства.

По линии организаций, обеспечивающих контроль за безопасностью окружающей природной среды в регионе с участием специалистов министерств ЖКХ и строительства, энергетики, сельского хозяйства необходимо провести аудит котельных по соблюдению нормативов допустимого выброса и соблюдению технологических регламентов их работы.

В организации и проведении экологического мониторинга атмосферного воздуха целесообразно взять пример с Челябинской области, где разработана комплексная программа и внедрена система экологического мониторинга, объединяющая все природоохранные службы региона (Министерство охраны окружающей среды, управления Росприроднадзора, Роспотребнадзора, Гидромета), с привлечением к участию в этом НИИ и вузов региона. Определена сеть экологического мониторинга, обоснован и утверждён перечень приоритетных показателей ЗВ по региону.

Начать эту работу целесообразно с крупных промышленных центров региона. Для этого необходима разработка комплексной программы экологического мониторинга с включением в неё типичного для каждого города перечня контролируемых показателей,

как общепромышленных, так и специфических ЗВ, проявляющих себя уже в настоящее время в ряде городов региона: хлороводород, фтороводород, сероводород, формальдегид, аммиак, фенол, сероуглерод, этилбензол, бенз(а)-пирен, соединения свинца, ртути и др.

Для вовлечения в процесс контроля и мониторинга атмосферного воздуха на территориях городских агломераций необходимо активизировать мобильные группы Министерства охраны окружающей среды, Росприроднадзора, Роспотребнадзора, Гидромета, учёных региона, общественности, корпуса общественных инспекторов экологического контроля. Наиболее конструктивно использовать в этом процессе программы «ГИС-экология». Доводить оперативную информацию до населения о состоянии и путях решения проблем по снижению загрязнения атмосферного воздуха, о мерах и реализуемых мероприятиях по модернизации предприятий.

Литература

1. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации [Электронный ресурс] <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/> (Дата обращения: 29.03.2024).
2. В большинстве регионов РФ наблюдается сокращение вредных выбросов в воздух [Электронный ресурс] <https://news.ecoindustry.ru/2023/06/v-bolshinstve-regionov-rf-nablyudaetsya-sokrashhenie-vrednyh-vybrosov-v-vozduh/> (Дата обращения: 29.03.2024).
3. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. М.: Росстат, 2023. 105 с.
4. О состоянии окружающей среды Кировской области в 2022 году: региональный доклад / Под общ. ред. Т.Э. Абашева. Киров: Министерство охраны окружающей среды Кировской области, 2023. 201 с.
5. О состоянии окружающей среды Кировской области в 2021 году: региональный доклад / под общей редакцией А.В. Албеговой. Киров: Министерство охраны окружающей среды Кировской области, 2022. 220 с.
6. Рутман В.В., Хето М.Х. Мониторинг атмосферного воздуха городской среды // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XXI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С. 59–64.
7. Рутман В.В., Хето М.Х. Исследование содержания запахообразующих веществ в атмосфере города // Экология родного края: проблемы и пути решения: материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2023. Книга 1. С. 353–356.

8. Рутман В.В., Хето М.Х., Ашихмина Т.Я. Применение ГИС-технологий для оценки состояния атмосферного воздуха городской среды // Технологии переработки отходов с получением новой продукции: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 206–211.

9. Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Тимонов А.С., Домнина Е.А., Дабах Е.В., Сырчина Н.В., Кондакова Л.В., Кутявина Т.И., Скугорева С.Г., Огородникова С.Ю., Рутман В.В., Кузнецов Д.А. Мониторинг атмосферного воздуха в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 38–46. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-038-046

10. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кировской области в 2022 году: государственный доклад. Киров: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 170 с.

11. Радиационно-гигиенический паспорт территории [Электронный ресурс] <https://www.kirovreg.ru/social/protect/passport.php> (Дата обращения: 29.03.2024).

12. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., Барышков Н.К., Библин А.М., Братилова А.Н., Кормановская Т.А., Романович И.К., Титова Т.Н., Журавлева В.Е., Сивенков А.Г., Цовьянов А.Г. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. 66 с.

13. Дьяков А. Вдохнуть и не дышать: как в России сокращают объёмы вредных выбросов [Электронный ресурс] <https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrn/654ba7f19a794735bde8d5b4?from=copy> (Дата обращения: 05.04.2024).

14. Седых В.А., Куролап С.А., Беяева Л.Н., Мазуров Г.И., Козлов А.Т., Закусилов В.П. Загрязнение воздушной среды формальдегидом и оценка риска канцерогенных эффектов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 73–79. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079

15. Кантор Г.Я., Сырчина Н.В. Альтернативная оценка вклада метана в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 197–207. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207

16. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 26–34. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034

2. Reduction of harmful emissions into the air is observed in most regions of the Russian Federation [Internet recourse] <https://news.ecoindustry.ru/2023/06/v-bolshinstve-regionov-rf-nablyudaetsya-sokrashhenievrednyh-vybrosov-v-vozduh/> (Accessed: 29.03.2024) (in Russian).

3. Main indicators of environmental protection. Statistical bulletin. Moskva: Rosstat, 2023. 105 p. (in Russian).

4. On the state of the environment of the Kirov region in 2022: regional report / Ed. T.E. Abashev. Kirov: Ministerstvo okhrany okruzhayushchey sredy Kirovskoy oblasti, 2023. 201 p. (in Russian).

5. On the state of the environment of the Kirov region in 2021: regional report / Ed. A.V. Albegova. Kirov: Ministerstvo okhrany okruzhayushchey sredy Kirovskoy oblasti, 2022. 220 p. (in Russian).

6. Rutman V.V., Kheto M.Kh. Monitoring of atmospheric air of urban environment // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: materialy XXI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2023. P. 59–64 (in Russian).

7. Rutman V.V., Kheto M.Kh. Study of the content of odor-forming substances in the city atmosphere // Ecology of the native land: problems and solutions: materialy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2023. Book 1. P. 353–356 (in Russian).

8. Rutman V.V., Kheto M.Kh., Ashikhmina T.Ya. Application of GIS-technologies for assessment of the state of atmospheric air of urban environment // Technologies of waste processing with obtaining new products: Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 206–211 (in Russian).

9. Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Timonov A.S., Domnina E.A., Dabakh E.V., Syrchina N.V., Kondakova L.V., Kutjavina T.I., Skugoreva S.G., Ogorodnikova S.Yu., Rutman V.V., Kuznetsov D.A. Atmospheric air monitoring in the area of enterprises for the disposal of hazardous industrial waste // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 38–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-038-046

10. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in Kirov region in 2022: State report. Kirov: Federalnaya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka, 2023. 170 p. (in Russian).

11. Radiation-hygienic passport of the territory [Internet recourse] <https://www.kirovreg.ru/social/protect/passport.php> (Accessed: 29.03.2024) (in Russian).

12. Barkovskiy A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R., Baryshkov N.K., Biblin A.M., Bratilova A.N., Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Titova T.N., Zhuravleva V.E., Sivenkov A.G., Tsovyanov A.G. Radiation situation on the territory of the Russian Federa-

References

1. Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation [Internet recourse] <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/> (Accessed: 29.03.2024) (in Russian).

tion in 2022: guide. Sankt-Peterburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva, 2023. 66 p. (in Russian).

13. Dyakov A. Breathing in and not breathing out: How Russia is reducing harmful emissions [Internet recourse] <https://trends.rbc.ru/trends/green/cmrm/654ba7f19a794735bde8d5b4?from=copy> (Accessed: 05.04.2024) (in Russian).

14. Sedykh V.A., Kurolap S.A., Belyaeva L.N., Mazurov G.I., Kozlov A.T., Zakusilov V.P. Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects //

Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079

15. Kantor G.Ya., Syrchina N.V. Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 197–207 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207

16. 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

Трансформация почвенных зооценозов в первый год после рубки леса

© 2024. А. А. Дитц, к. б. н., с. н. с.,
Т. Н. Конакова, к. б. н., н. с., А. А. Фатеева, аспирант,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kolesnikova@ib.komisc.ru

Почвенные зооценозы среднетаёжных лесов коренного типа характеризуются высокой численностью (94,6–146,6 экз./м²), таксономическим богатством (10–14 таксонов), доминированием личинок Diptera и Cantharidae, сходством состава фауны ($J=0,60-0,65$), соотношением сапрофагов и зоофагов, равным 1:1, агрегированным или случайным горизонтальным распределением. В первый год после проведения рубки общая численность беспозвоночных резко снижается (4,5–26,8 экз./м²), из состава фауны элиминируются отдельные таксоны (остаётся 4–7 таксонов), соотношение трофических групп изменяется, распределение беспозвоночных в пространстве нарушено. На пасаках (П) почвенные зооценозы сохраняют таксономическую структуру, близкую к контрольным площадкам (К). На волоках с тремя (3П) и десятью (10П) проходками агрегатной техники, рекультивируемом (10Р) и магистральном (МП) волоках таксономическая и трофическая структура почвенных зооценозов нарушена сильнее. На волоках высока численность личинок Diptera – временных r-стратегов, характерных для нарушенной среды. Соотношение сапрофагов и зоофагов в ряду технологических площадок «К – П – 3П – 10П – 10Р – МП» составило: 1:1 – 3:1 – 7:1 – 10:1 – 13:1 – 15:1. Отмечена тенденция к увеличению численности сапрофагов на 10Р и МП. Снижение общей численности макрофауны и сокращение систематических групп на пасаках не столь значительно из-за того, что подстилка на этих площадках после рубки почти полностью сохраняется. Относительно низкое разнообразие почвенных зооценозов на волоках объяснимо изменением естественных условий существования беспозвоночных из-за уплотнения верхних горизонтов почвы, частичного исчезновения живого напочвенного покрова до появления минерализованного слоя почвы, увеличения влажности. Существенные изменения численности, состава, соотношения трофических групп беспозвоночных в первый год после проведения рубки указывают на коллапс почвенных зооценозов, выпадение важных групп деструкторов и хищников из трофических сетей, снижение качества выполняемых ими функций на начальной стадии восстановительной сукцессии.

Ключевые слова: почвенная макрофауна, Lumbricidae, Lithobiidae, Staphylinidae, Elateridae, вырубка, лес, катена, Республика Коми.

Transformation of soil macrofauna in the first year after deforestation

© 2024. А. А. Ditts ORCID: 0000-0001-7524-3857
Т. N. Konakova ORCID: 0000-0002-3641-3339
А. А. Fateeva ORCID: 0000-0003-3094-243X
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: kolesnikova@ib.komisc.ru

Soil macrofauna of primary forests of the middle taiga is characterized by high abundance (94.6–146.6 ind./m²), taxonomic richness (10–14 taxa), dominance of Diptera and Cantharidae larvae, similarity of fauna composition ($J=0.60-0.65$), with a ratio of detritivores and predators equal to 1:1, aggregated or random horizontal distribution. The total density of invertebrates sharply decreases (4.5–26.8 ind./m²) in the first year after deforestation. Some taxa are eliminated from the fauna, 4–7 taxa are remained. The ratio of trophic groups is changed. The distribution of invertebrates in space is disturbed. Soil macrofauna of clear-cutting areas (CCA) retains a taxonomic structure close to the control sites (C). The taxonomic and trophic structure of soil macrofauna is more disturbed on the logging corridors (LC) with three (3LC) and ten (10LC) penetrations of aggregate equipment, recultivated (RLC) and main (MLC) logging corridors. Thus, the density of Diptera larvae is high on the logging corridors. The above are temporary r-strategists characteristic for the

disturbed environment. And the ratio of detritivores and predators on the technological sites “C – CCA – 3LC – 10LC – RLC – MLC” is 1:1 – 3:1 – 7:1 – 10:1 – 13:1 – 15:1. A trend towards an increase in the density of detritivores on the recultivated (RLC) and main (MLC) logging corridors was noted. The decrease of the total density of macrofauna and the declining of systematic groups of the clear-cutting areas is not so significant due to the fact that the litter on these sites is almost completely preserved after felling. The low diversity of soil macrofauna on the logging corridors can be explained by a change in the natural conditions for the existence of invertebrates due to the compaction of the upper soil horizons, the partial disappearance of the litter, the appearance of a mineralized soil layer as top horizon, and a rapid change in humidity. Significant changes in the abundance, composition, and ratio of trophic groups of invertebrates indicate the collapse of soil macrofauna, the loss of important groups of destructors and predators from food webs, and a decrease in the quality of their functions at the initial stage of restorative succession, in the first year after deforestation.

Keywords: soil macrofauna, Lumbricidae, Lithobiidae, Staphylinidae, Elateridae, deforestation, forest, catena, Komi Republic.

В бореальной зоне лесозаготовительные мероприятия приводят к трансформации лесного растительного покрова и преобразованию почв естественно развивающихся экосистем в антропогенные [1]. Возобновление растительности после рубок хвойных древостоев происходит через смену пород и доминантов напочвенного покрова, что способствует изменению состава растительного опада и морфологических свойств подстилок [2]. Нарушения экологических связей и пространственной структуры элементов лесного насаждения, вызванные рубкой, влекут за собой перестройку почвенных зооценозов и изменение их функциональной активности [3, 4].

Самые негативные последствия для беспозвоночных имеют рубки с высокой повторяемостью (оборот рубки 20–40 лет). Не менее важные факторы, определяющие степень трансформации почвенных зооценозов, – возраст рубки, сезон проведения рубки, размер и форма лесосеки, способ и сроки примыкания лесосек, технология лесозаготовок, степень механического нарушения почвенного покрова [5]. Наименее нарушенными участками являются пасеки. На волоках многократный проход тяжёлой агрегатной техники ведёт к переуплотнению почв, механическому перемешиванию лесных подстилок, минеральных горизонтов и порубочных остатков [2]. Изменение экологических условий в первые годы после проведения рубок инициирует постепенное увеличение трофической активности почвенной фауны при переходе от трелёвочных волоков к пасечным участкам [6].

Почвенные зооценозы устойчивы к катастрофическим нарушениям экосистем [7], но механизмы их восстановления на вырубках не всегда ясны [8]. На начальных стадиях восстановительной сукцессии наблюдаются снижение биомассы беспозвоночных, депрессия и гибель сапрофагов, усиление пресса хищников, смена типа трофической цепи с детритной на пастбищную, деградация подстилочного

комплекса, падение видового богатства [9]. Восстановление почвенного населения на вырубках определяется скоростью регенерации пригодных местообитаний и возможностью расселения беспозвоночных с соседних участков [10]. Для разных таксономических групп беспозвоночных темпы восстановительной сукцессии отличаются. Основные изменения в почвенных зооценозах происходят в течение первых двух лет после нарушения, уже через 14–15 лет после рубки фауна близка по составу к ненарушенным участкам, по прошествии 30 лет после рубки почвенная фауна практически восстанавливается до естественных значений [11].

Цель нашего исследования состоит в выявлении изменений численности, состава и трофической структуры почвенных зооценозов на пасечных площадках и трелёвочных волоках в первый год после рубки леса, на начальной стадии восстановительной сукцессии.

Объекты и методы исследования

В мае 2020 г. на территории Сыктывкарского лесничества (Республика Коми) выбран участок (N 61°55'01,8", E 50°32'20,6"), где согласно набору позиций и порядку следования на катене заложены три пробные площади (ПП), расстояние между которыми составило не менее 30 м: ПП1 – верхняя (северная) часть, ельник чернично-зеленомошный на элювиальной позиции (E1), ПП3 – елово-сосновое сообщество, располагающееся на склоне и занимающее транзитную позицию (Tr), ПП2 – нижняя часть, березняк таволговый в долине ручья, на аллювиальной или аккумулятивной позиции (Ac). Этот участок был выделен в ноябре 2020 г. под рубку, с технологическими элементами пасеки (П) и трелёвочных волоков, по мере увеличения механической нагрузки: 3П – волок с тремя проходками техники, 10П – волок с 10 проходками техники, 10Р – рекультиви-

руемый волок, МП – магистральный волок (рис. 1). На пасечных площадках отмечены пни срубленных деревьев, порубочные остатки и малочисленные молодые древесные породы ели (*Picea obovata*), сосны (*Pinus sylvestris*) и берёзы (*Betula pubescens*), подлесок и мохово-лишайниковый ярус практически не пострадали. Трелёвочные волока вытянуты лентами между пасечными участками, здесь наблюдается слабое заболачивание, растительность сохранилась между колеями.

В июле 2020 г., до рубки, на каждой ПП проведён отбор 25 почвенных образцов размером 10×10×8 см по регулярной сетке (с шагом 5 м, 5 рядов по 5 проб в каждом ряду), итого 75 проб на катене.

В лабораторных условиях проведена выгонка беспозвоночных (итого 601 экз.) из этих образцов, подсчитана численность таксонов и определён состав почвенных зооценозов на ПП1, ПП2 и ПП3. Эти данные приняты за «фоновые». В июле 2021 г., после рубки, на пасечных площадках отобрано ещё 75 почвенных образцов (по 25 проб на каждой ПП, с некоторыми изменениями в сетке отбора – с шагом 4 м, 6 рядами по 4–5 проб в ряду, из-за ограниченной ширины пасечных площадок),

собрано 78 экз. беспозвоночных, – это «импактные» данные. Такой отбор проб позволяет оценить особенности горизонтального распределения почвенных беспозвоночных на исследуемых ПП до и после рубки леса. Летом 2021 г. на пасечных площадках и волоках (ЗП, 10П, 10Р, МП) отобрано 174 почвенных образца, на контрольных лесных площадках – 30 проб (табл. 1), идентифицировано 1208 экз. беспозвоночных. На основе этих учётов проанализированы обобщённые за летний период данные по численности и составу почвенных зооценозов на разных технологических площадках рассматриваемых ПП.

Статистическая обработка результатов (описательная статистика) проведена в программе Microsoft Office Excel 2016, рассчитаны показатели: среднее ± стандартная ошибка ($M \pm SE$), индексы разнообразия Шеннона (H), сходства Жаккара (J), по качественным данным, и индекса агрегированности Кейси (I_c).

Результаты и обсуждение

Почвенные зооценозы до рубки леса. Почвенные зооценозы на ПП1, ПП3 и ПП2 незначительно отличаются по таксономическому

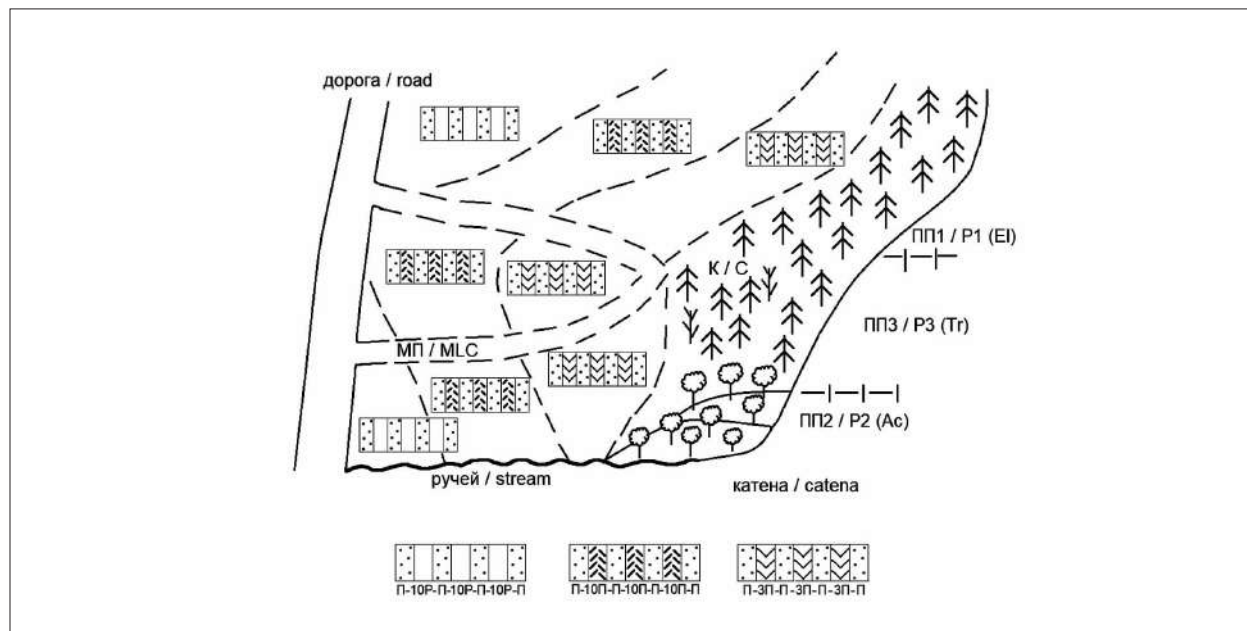


Рис. 1. Карта-схема исследуемого участка. Пробная площадь: ПП1 – ельник (El), ПП3 – елово-сосновое сообщество (Tr), ПП2 – березняк (Ac). El – элювиальная, Tr – транзитная, Ac – аккумулятивная позиция катены. Технологическая площадка: ЗП – волок с тремя проходками техники, 10П – волок с 10 проходками техники, 10Р – рекультивируемый волок, МП – магистральный волок, П – пасека, К – контроль
Fig. 1. Research area map-scheme. Plot: P1 – spruce forest (El), P3 – spruce-pine forest (Tr), P2 – birch forest (Ac). El – eluvial, Tr – transitional, Ac – accumulative position on catena. Technological site: 3LC – logging corridor with three penetrations of aggregate equipment, 10LC – logging corridor with ten penetrations of aggregate equipment, RLC – recultivated logging corridor, MLC – main logging corridor, CCA – clear-cutting area, C – control site

Таблица 1 / Table 1

Количественный учёт беспозвоночных на технологических площадках
Quantitative account of invertebrates on the technological sites

Технологическая площадка Technological site	Число проб (число экз.) / Number of samples (number of individuals)					
	май May	июнь June	июль July	август August	сентябрь September	итого in sum
ЗП / 3LC	9 (63)	9 (8)	9 (21)	9 (65)	9 (97)	45 (254)
10П / 10LC	9 (42)	9 (9)	9 (53)	9 (31)	9 (275)	45 (410)
10Р / RLC	6 (44)	6 (6)	6 (13)	6 (16)	6 (141)	30 (220)
МП / MLC	3 (6)	–	–	3 (7)	3 (21)	9 (34)
П / CCA	9 (67)	9 (6)	9 (24)	9 (26)	9 (29)	45 (152)
К / C	6 (33)	6 (9)	6 (31)	6 (13)	6 (52)	30 (138)

Примечание. Технологическая площадка: ЗП – волок с тремя проходками техники, 10Р – волок с 10 проходками техники, 10П – рекультивируемый волок, МП – магистральный волок, П – пасека, К – контроль. Проверк означает, что пробы не отбирали.

Note. Technological site: 3LC – logging corridor with three penetrations of aggregate equipment, 10LC – logging corridor with ten penetrations of aggregate equipment, RLC – recultivated logging corridor, MLC – main logging corridor, CCA – clear-cutting area, C – control site. A dash means that soil samples were not collected.

составу ($J=0,60-0,65$). В ельнике и березняке зарегистрировано по 14 таксонов, в елово-сосновом сообществе – десять групп. Индекс разнообразия Шеннона (H) несколько выше на ПП1 и ПП2 (2,1 и 2,0 соответственно), чем на ПП3 (1,8). Структура сообществ почвенных беспозвоночных без особых различий, на всех ПП доминировали личинки двукрылых (Diptera) и мягкотелок (Cantharidae). В ельнике не зарегистрированы личинки жуужелиц (Carabidae), которые есть в елово-сосновом сообществе и березняке. На (E1) и (Tr) позициях катены не отмечены тараканы (Blattoptera) и мокрицы (Isopoda), встреченные в березняке. Эти группы беспозвоночных населяют подстилку широколиственных лесов, где занимают доминантные позиции, вытесняя других беспозвоночных, при этом не характерны для среднетаёжных лесов. Но в березняке не обнаружены основные деструкторы лесной подстилки в таёжной зоне – дождевые черви (Lumbricidae), обеднён состав фитофагов, среди которых нет полужесткокрылых (Heteroptera) и трипсов (Thysanoptera). Вместе с тем, в березняке в два раза выше численность ещё одной важной группы деструкторов опада – диплопод (Diploroda), относительно ельника в верхней части катены (табл. 2).

В елово-сосновом сообществе на склоне катены диплоподы не выявлены. Группы Aranei, Lithobiidae, Staphylinidae, Elateridae, Coccidae, встреченные на всех ПП, составляют ядро почвенной фауны в среднетаёжных лесах.

Общая численность почвенной фауны наиболее высока на ПП1, несколько ниже на ПП3 и почти в 1,5 раза меньше на ПП2

(табл. 2). Соотношение трофических групп указывает на то, что сапрофаги и зоофаги составляют основу почвенных зооценозов до рубки (рис. 2).

В ельнике (ПП1) и березняке (ПП2) выявлено агрегированное распределение почвенных беспозвоночных, в елово-сосновом сообществе (ПП3) – случайное (табл. 3).

Почвенные зооценозы после рубки леса.

В первый год после проведения рубки зарегистрировано угнетение почвенной фауны по всей катене, на пасечных площадках. Число зарегистрированных таксонов сократилось в два раза, но состав фауны сходный ($J=0,57-0,75$). На ПП1 отмечено четыре таксона (Lithobiidae, Elateridae, Diptera и Thysanoptera), до рубки их было 14, сходство фауны до и после рубки лишь 29%. На склоне (ПП3) и внизу (ПП2) катены выявлено по семь таксонов. Сходство почвенных зооценозов на ПП3 и ПП2 до и после рубки составило 67 и 31% соответственно. Соотношение групп изменилось вследствие обеднения почвенной фауны, в число доминантов вошли Diptera, Lithobiidae, Coccidae, Thysanoptera. Выпали редкие и наиболее важные группы деструкторов опада (табл. 2). Ожидаемо снизился индекс Шеннона (H) на ПП1 (до 1,4) и ПП2 (до 1,7), таксономическое разнообразие беспозвоночных осталось прежним на склоне катены, ПП3 ($H=1,7$). Общая численность почвенной фауны снизилась в 3,5 (ПП2), 8 (ПП3) и более чем в 30 раз (ПП1) по сравнению с показателями, которые были до рубки. Самая высокая численность почвенной фауны отмечена на ПП2, внизу катены. После рубки снизилась численность зоофагов. Численность сапрофагов в верхней

Таблица 2 / Table 2

Состав и численность (средняя ± стандартная ошибка, экз./м²) почвенной фауны на катене
Composition and density (average ± standard error, ind./m²) of soil fauna on the catena

Таксон / Taxon	До рубки / Before clear-cutting			После рубки / After clear-cutting		
	ПП1 / P1	ПП3 / P3	ПП2 / P2	ПП1 / P1	ПП3 / P3	ПП2 / P2
Gastropoda	0,6±0,6	–	0,6±0,6	–	–	–
Lumbricidae	3,2±3,2	1,9±1,1	–	–	–	–
Diplopoda	2,6±1,2	–	5,8±3,1	–	–	–
Lithobiidae	12,2±3,5	7,7±2,1	9,6±2,8	1,3±0,9	3,2±1,3	5,1±1,8
Aranei	12,2±2,9	8,9±2,8	3,2±1,6	–	1,3±0,9	2,6±1,2
Carabidae, larv.	–	0,6±0,6	0,6±0,6	–	–	–
Staphylinidae	9,6±2,4	10,9±2,6	1,3±0,9	–	–	–
Elateridae, larv.	16,6±3,7	8,3±2,5	5,1±2,2	1,3±0,9	1,3±0,9	1,3±0,9
Cantharidae, larv.	14,1±4,1	48,0±18,2	23,1±7,0	–	0,6±0,6	–
Diptera, larv.	56,9±10,5	37,1±7,5	28,8±6,1	1,3±0,9	1,9±1,1	8,9±2,8
Coccidae	2,6±1,2	17,9±0,1	8,9±4,5	–	5,1±3,0	3,2±1,6
Hymenoptera, larv.	4,5±1,9	1,3±0,9	1,3±0,9	–	–	–
Formicidae	5,8±2,4	–	1,3±0,9	–	–	–
Heteroptera	3,8±2,3	–	–	–	–	1,9±1,1
Thysanoptera	1,9±1,1	–	–	0,6±0,6	5,1±1,5	3,8±1,7
Blattoptera	–	–	0,6±0,6	–	–	–
Isopoda	–	–	5,1±5,1	–	–	–
Число таксонов Number of taxa	14	10	14	4	7	7
Численность Total density	146,6±18,4	142,6±29,7	95,3±17,2	4,5±2,4	18,5±4,3	26,8±4,7

Примечание. Пробная площадь: ПП1 – ельник (El), ПП3 – елово-сосновое сообщество (Tr), ПП2 – березняк (Ac).
Прочерк означает, что таксон не зарегистрирован.

Note. Plot: P1 – spruce forest (El), P3 – spruce-pine forest (Tr), P2 – birch forest (Ac). A dash means that taxon is not registered.

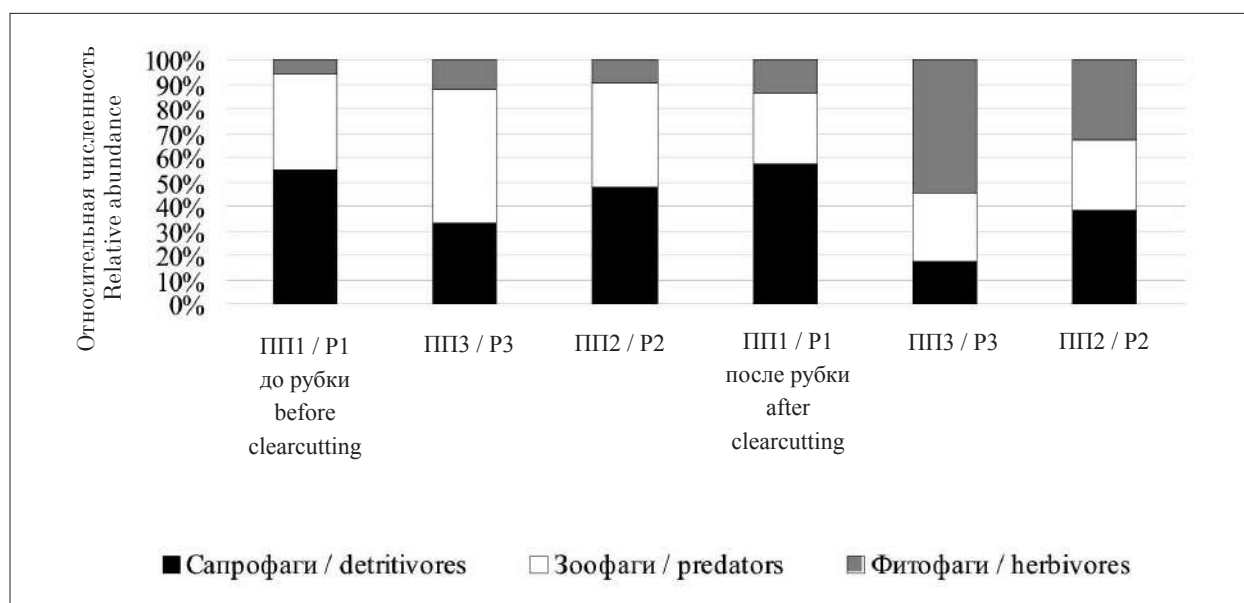


Рис. 2. Соотношение трофических групп беспозвоночных на катене: ПП 1 – ельник (El), ПП 3 – елово-сосновое сообщество (Tr), ПП 2 – березняк (Ac), до и после рубки
Fig. 2. The ratio of trophic groups of invertebrates on the catena: P1 – spruce forest (El), P3 – spruce-pine forest (Tr), P2 – birch forest (Ac), before and after clear-cutting

Таблица 3 / Table 3

Индекс агрегированности Кейси (I_c) для почвенных зооценозов на катене
Index of aggregation (I_c) for soil macrofauna in the catena

Группа / Groupe	До рубки Before clear-cutting			После рубки After clear-cutting		
	ПП1 / P1	ПП3 / P3	ПП2 / P2	ПП1 / P1	ПП3 / P3	ПП2 / P2
Сапрофаги / Detritivores	10,8	0,1	5,8	-2,6	-3,4	0,1
Зоофаги / Predators	2,3	0,2	11,8	-11,6	-2,2	-1,6
Фитофаги / Herbivores	1,8	0,3	11,1	-24	3,3	0,1
Почвенная фауна / Soil fauna	12,8	0,1	23,2	0,2	1,6	1,0

Примечание. Пробная площадь (ПП): 1 – ельник (El), 3 – елово-сосновое сообщество (Tr), 2 – березняк (Ac).
Note. Plot (P): 1 – spruce forest (El), 3 – spruce-pine forest (Tr), 2 – birch forest (Ac).

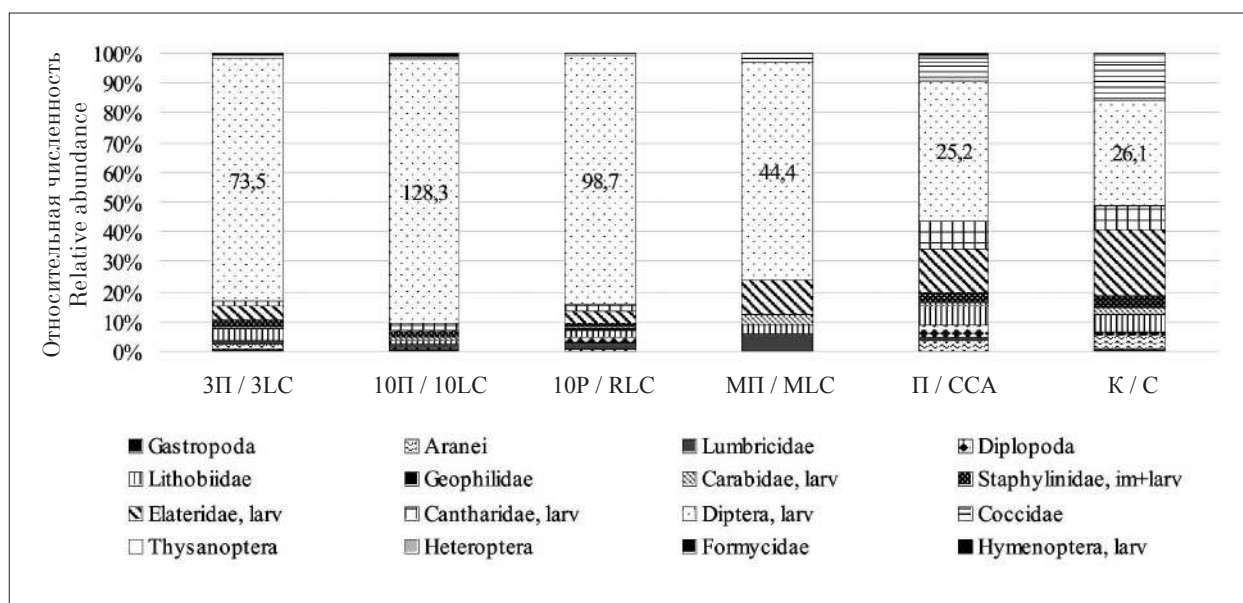


Рис. 3. Таксономическая структура почвенной фауны на технологических площадках: 3П – волок с тремя проходками техники, 10П – волок с 10 проходками техники, 10П – рекультивируемый волок, МП – магистральный волок, П – пасека, К – контроль
Fig. 3. Taxonomic structure of soil fauna on the technological sites: 3LC – logging corridor with three penetrations of aggregate equipment, 10LC – logging corridor with ten penetrations of aggregate equipment, RLC – recultivated logging corridor, MLC – main logging corridor, CCA – clear-cutting area, C – control site

части катены (ПП1) осталась прежней, за счёт личинок двукрылых и щелкунов, а на ПП3 и ПП2 уменьшилась. Численность фитофагов возросла на всех ПП (рис. 2). Очевидно резкое снижение индекса Кейси (I_c) для сообществ почвенных беспозвоночных (табл. 3). Достоверные значения, определяющие случайное распределение беспозвоночных, отсутствуют, и это подтверждает остаточный характер почвенной фауны в первый год после рубки, вследствие элиминации беспозвоночных.

Почвенные зооценозы на технологических площадках. Почвенные зооценозы пашек сохранили таксономическую структуру, близкую к контрольным площадкам. А для

почвенных зооценозов на трелёвочных волоках, несмотря на повышенную численность (средний показатель – 103,5 экз./м²) относительно контрольных и пашечных площадок, выявлены изменения таксономической и трофической структуры. Высокая численность беспозвоночных на волоках обусловлена доминированием личинок двукрылых (Diptera), которые являются временными г-стратегами и характерны для нарушенных местообитаний (рис. 3). Соотношение сапрофагов (с учётом личинок двукрылых) и зоофагов в ряду технологических площадок «К – П – 3П – 10П – 10П – МП» составило 1:1 – 3:1 – 7:1 – 10:1 – 13:1 – 15:1. В разы увеличилась численность

сапрофагов на технологических площадках со значимым механическим воздействием (10Р, МП). Соотношение сапрофагов (без учёта личинок двукрылых) и зоофагов на контрольных (К) и пасечных (П) площадках одинаково – 1:1 и совпадает с таковым для рекультивируемого волокна (10Р), где, кроме дождевых червей (2,7 экз./м²), отмечены кивсяки (2,1 экз./м²) и проволочники (4,8 экз./м²). Высокая численность Elateridae (7,1 экз./м²) и Lumbricidae (3,6 экз./м²), а также представленность зоофагов только семействами Lithobiidae (1,8 экз./м²) и Carabidae (1,8 экз./м²) определили соотношение сапрофагов и зоофагов на магистральном волокне (МП), равное 3:1. А на волокнах 3П и 10П соотношение сапрофагов (без учёта личинок двукрылых) и зоофагов составило 1:2 и 1:3.

Вероятно, большая степень механического воздействия техники на волокнах 10Р и МП, а именно перемешивание относительно глубоких почвенных горизонтов с поверхностными, способствует вертикальному перемещению на поверхность беспозвоночных с продолжительным циклом развития (до 5 лет у проволочников) в почве. Вместе с тем, зоофаги (Lithobiidae, Carabidae, Staphylinidae, Cantharidae) активно перемещаются и мигрируют с непригодных для жизни участков на соседние или остаются в стадиях переживания (=микрорефугиумах) на волокнах 3П и 10 П, с меньшей антропогенной нагрузкой. Доля фитофагов на разных технологических площадках незначительна, относительно выше на контрольных (20% от фауны) и пасечных (10%) площадках, чем на волокнах (1–5%). Повышение численности фитофагов после рубки произошло за счёт снижения численности зоофагов и сапрофагов, из-за их элиминации из состава почвенных зооценозов.

Изменения почвенных зооценозов в первый год после рубки леса. Почвы бореальных лесов отличаются невысоким разнообразием беспозвоночных животных. Макрофауна еловых лесов состоит из 16 надвидовых таксонов, доминируют Aranei и Lithobiidae. Численность макрофауны в среднетаёжных ельниках относительно стабильна, её максимальные значения зарегистрированы в лесах зеленомошного и травянистого типа [12]. Почвенные зооценозы исследованного лесного массива до рубки характеризуются высокой численностью, экз./м² (146,6 – на ПП1, 142,6 – на ПП3, 95,3 – на ПП2), таксономическим богатством (10–14), доминированием личинок Diptera и Cantharidae, сходством состава фауны, фауны, равным соотношением сапрофагов и зоо-

фагов (1:1), агрегированным (ПП1 и ПП2, на верху и внизу катены) или случайным (ПП3, на склоне) горизонтальным распределением. Таксономический состав и соотношение трофических групп типичны для хвойных лесов подзоны средней тайги [12].

В первый год после рубки общая численность беспозвоночных на пасеках всех ПП резко снижается (4,5 – на ПП1, 18,5 – на ПП3, 26,8 – на ПП2), из состава фауны элиминируются отдельные таксоны (остается 4–7 таксонов), соотношение трофических групп на ПП1 прежнее, а на ПП3 и ПП2 изменяется за счёт повышения доли фитофагов, пространственное распределение беспозвоночных нарушено. Непосредственно после рубки наблюдается остаточный состав фауны, представленный группами беспозвоночных, типичных для среднетаёжных лесов. Такая трансформация почвенных зооценозов закономерна, так как в первые два года после рубки происходит разрушение лесной ассоциации. Из-за резкого изменения режима освещённости, увлажнения и теплообмена отмечается слабый процесс заболачивания почв [2, 4]. Начиная с момента сведения леса, численность беспозвоночных резко падает в 2–3 раза на лесосеках 1–3 лет по сравнению с коренным типом леса. Затем, на вырубках последующих лет, отмечается постепенное возрастание численности почвенного населения [13]. В первые годы после сплошнолесосечных рубок основу почвенной фауны составляют зоофаги (до 50%), после добровольно-выборочных рубок слабой интенсивности – фитофаги [4, 13]. Итак, основное влияние рубки леса на начальной стадии восстановительной сукцессии состоит в снижении общей численности макрофауны, сокращении систематических групп и изменении соотношения трофических групп.

На пасеках структура почвенных зооценозов в первый год после рубки близка к контрольным сообществам в лесу коренного типа. Это явление обусловлено двумя возможными источниками восстановления почвенной фауны непосредственно в первый год после рубки леса. Во-первых, возможно заселение пасечных участков животными, обитающими в ненарушенных условиях смежных территорий. Во-вторых, гетерогенность почвенной среды предполагает неоднородность её нарушения. Благодаря этому в формирующихся многочисленных слабо нарушенных участках выживает достаточно большая доля почвенной фауны [14]. На волокнах структура почвенных зооценозов упрощена, так как значительное уплот-

нение верхних горизонтов почвы, частичное исчезновение живого напочвенного покрова, появление на поверхности минерализованного слоя почвы, изменение светового режима и влажности, отсутствие слабо нарушенных участков приводят к ухудшению естественных условий существования представителей макрофауны [4]. Поэтому почвенные зооценозы на волоках характеризуются низким разнообразием по сравнению с пашками в первый год после рубки леса.

Заключение

В первый год после рубки леса в подзоне средней тайги на начальной стадии восстановительной сукцессии наблюдаются существенные изменения численности, состава, трофической структуры сообществ беспозвоночных, которые указывают на трансформацию почвенных зооценозов, выпадение важных групп деструкторов и хищников из трофических сетей, снижение качества выполняемых ими функций. Важным условием для дальнейшего восстановления структуры и функций почвенных зооценозов является то, насколько сохранились травяно-кустарничковый ярус и подстилка в результате рубки леса. Чем меньше степень механического воздействия техники на волоках, тем оптимальнее условия для сохранения популяций почвенных беспозвоночных.

Работа выполнена в рамках темы НИР отдела экологии животных «Разнообразие фауны и пространственно-экологическая структура животного населения европейского северо-востока России и сопредельных территорий в условиях изменения окружающей среды и хозяйственного освоения», рег. № 122040600025-2.

Литература

1. Richter D. deB., Yaalon D.H. "The changing model of soil" revisited // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. V. 76. P. 766–778. doi: 10.2136/sssaj2011.0407
2. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. doi: 10.7868/S0032180X17070024
3. Siira-Pietikäinen A., Haimi J., Siitonen J. Short-term responses of soil macroarthropod community to clear felling and alternative forest regeneration methods // For. Ecol. Manage. 2003. V. 172. No. 2–3. P. 339–353. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00811-8
4. Дорохов К.В., Шелуха В.П. Изменение видового состава и популяционной структуры почвенной мезофауны в результате низовых пожаров и рубок леса //

Вестник ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 4 (24). С. 31–47.

5. Kataja-aho S., Hannonen P., Liukkonen T., Rosten H., Koivula M.J., Koponen S., Haimi J. The arthropod community of boreal Norway spruce forests responds variably to stump harvesting // For. Ecol. Manage. 2016. V. 371. P. 75–83. doi: 10.1016/j.foreco.2016.01.025

6. Безкоровая И.Н., Антонов Г.И., Иванов В.В., Семенякин Д.А. Биологическая активность почв после сплошных рубок в сосняках Красноярской лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 238–242.

7. Кривошук Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 268 с.

8. Niemela J. Management in relation to disturbance in the boreal forest // For. Ecol. Manage. 1999. V. 115. P. 127–134. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00393-4

9. Ганин Г.Н. Почвенные животные Уссурийского края. Владивосток–Хабаровск: Дальнаука, 1997. 160 с.

10. Fahrig L., Merriam G. Conservation of fragmented populations // Conserv. Biol. 1994. V. 8. No. 1. P. 50–59. doi: 10.1046/J.1523-1739.1994.08010050.X

11. Česonienė L., Daubaras R., Tamutis V., Kaškonienė V., Kaškonas P., Stakėnas V., Zych M. Effect of clear-cutting on the understory vegetation, soil and diversity of litter beetles in scots pine-dominated forest // J. Sustainable For. 2019. V. 38. No. 8. P. 791–808. doi: 10.1080/10549811.2019.1607755

12. Колесникова А.Ф., Конакова Т.Н. Почвенная мезофауна бореальных лесов европейского северо-востока России // Евразийский энтомологический журнал. 2019. Т. 18. № 5. С. 312–319. doi: 10.15298/euroasentj.18.5.2

13. Матвеев В.А. Почвенная мезофауна сложных ельников и её изменение при рубке леса и смене пород // Научные труды заповедника «Большая Кокшага». 2011. № 5. С. 208–235.

14. Гонгальский К.Б. Перфугиумы как механизм восстановления почвенной фауны после нарушений экосистем // Russ. J. Ecosyst. Ecol. 2017. Т. 2 (4). doi: 10.21685/2500-0578-2017-4-3

References

1. Richter D. deB., Yaalon D.H. "The changing model of soil" revisited // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. V. 76. P. 766–778. doi: 10.2136/sssaj2011.0407
2. Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: A review // Pochvovedenie. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17070024
3. Siira-Pietikäinen A., Haimi J., Siitonen J. Short-term responses of soil macroarthropod community to clear felling and alternative forest regeneration methods // For. Ecol. Manage. 2003. V. 172. No. 2–3. P. 339–353. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00811-8
4. Dorokhov K.V., Shelukho V.P. Change of species composition and population structure of soil mesofauna

caused by creeping fires and timber felling // Vestnik PGTU. Series: Forest. Ecology. Nature Management. 2014. No. 4 (24). P. 31–47 (in Russian).

5. Kataja-aho S., Hannonen P., Liukkonen T., Rosten H., Koivula M.J., Koponen S., Haimi J. The arthropod community of boreal Norway spruce forests responds variably to stump harvesting // For. Ecol. Manage. 2016. V. 371. P. 75–83. doi: 0.1016/j.foreco.2016.01.025

6. Bezkorovaynaya I.N., Antonov G.I., Ivanov V.V., Semenyakin D.A. Biological activity of soils after partial felling in pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe // Khvoynye borealnoy zony. 2010. V. 27. No. 3–4. P. 238–242 (in Russian).

7. Krivolutskiy D.A. Soil fauna in ecological control. Moskva: Nauka, 1994. 268 p. (in Russian).

8. Niemela J. Management in relation to disturbance in the boreal forest // For. Ecol. Manage. 1999. V. 115. P. 127–134. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00393-4

9. Ganin G.N. Soil animals of the Ussuri region. Vladivostok–Khabarovsk: Dalnauka, 1997. 160 p. (in Russian).

10. Fahrig L., Merriam G. Conservation of fragmented populations // Conserv. Biol. 1994. V. 8. No. 1. P. 50–59. doi: 10.1046/J.1523-1739.1994.08010050.X

11. Česonienė L., Daubaras R., Tamutis V., Kaškonienė V., Kaškonas P., Stakėnas V., Zych M. Effect of clear-cutting on the understory vegetation, soil and diversity of litter beetles in scots pine-dominated forest // J. Sustainable For. 2019. V. 38. No. 8. P. 791–808. doi: 10.1080/10549811.2019.1607755

12. Kolesnikova A.F., Konakova T.N. Soil macrofauna of the boreal forests in the north-eastern part of European Russia // Euroasian Entomological Journal. 2019. V. 18. No. 5. P. 312–319 (in Russian). doi: 10.15298/euroasentj.18.5.2

13. Matveev V.A. Soil mesofauna of compound spruce forest and its changes caused by forest cutting and alternation of species // Nauchnye trudy zapovednika “Bolshaya Kokshaga”. 2011. No. 5. P. 208–235 (in Russian).

14. Gongalsky K.B. Perfugia as a mechanism of recovery of soil fauna after ecosystem disturbances // RJEE. 2017. V. 2 (4) (in Russian). doi: 0.21685/2500-0578-2017-4-3

Drosophila melanogaster как модель *in vivo*
для оценки цитогенетических эффектов
низкоинтенсивного ионизирующего излучения

© 2024. Е. А. Юшкова, 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: ushkova@ib.komisc.ru

Загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами, даже в малых концентрациях и дозах, приводит к структурно-функциональным модификациям генетического аппарата клеток животных и растений. Повышенный уровень повреждений ДНК свидетельствует о наличии цитогенетического эффекта в ответ на радиационный стресс. В данной работе исследованы частоты радиационно-индуцированных повреждений ДНК в разных соматических клетках *Drosophila melanogaster* после воздействия широкого диапазона доз низкоинтенсивного облучения. Степень повреждаемости ДНК после облучения зависела от генетических характеристик испытываемых линий. Генотипы с нарушенной антиоксидантной системой имели повышенный уровень радиационно-индуцированных простых повреждений ДНК (щелочно-лабильные сайты, одностранные разрывы) во всех соматических клетках. Особи с низким функционированием репарационных процессов были чувствительны к низкоинтенсивному облучению по показателю «двунитевые разрывы». В имагинальных дисках численность клеток с двунитевыми разрывами была выше, чем в нейробластах. Исследуемые линейные особи *D. melanogaster* могут быть использованы в качестве чувствительных моделей для оценки радиационной обстановки окружающей среды в условиях техногенного воздействия.

Ключевые слова: *Drosophila melanogaster*, облучение, цитогенетические эффекты, мутации в генах репарации и антиоксидантной защиты.

Drosophila melanogaster as an *in vivo* model
for assessing the cytogenetic effects
of low-intensity ionizing radiation

© 2024. E.A. Yushkova ORCID: 0000-0002-5580-2276*
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: ushkova@ib.komisc.ru

The most important target of radiation damage is the cell nucleus. Structural and functional changes occurring in the nucleus under the influence of ionizing radiation affect the development of different biological effects at the cellular and organismal levels. In the present study, the Comet assay was used which makes it possible to assess the complex of DNA damage in different somatic cells of the body. The specificity of the cytogenetic effect of irradiation in low doses in *Drosophila melanogaster* has been established. The observed reactions depended not only on the irradiation dose and genotype but also on the type of DNA damage and tissue. In general, neuroblasts of individuals with low synthesis of cytoplasmic superoxide dismutase (*sodⁿ¹/+*) showed the highest sensitivity to irradiation in low doses. With an increase in the dose of ionizing radiation, the frequency of alkali-labile sites and DNA single-strand breaks in *sodⁿ¹*-genotype cells increased. The repair mutant genotypes, on the contrary, had radiosensitive traits exclusively at the level of DNA double-strand breaks. To a greater extent, an increase in the yield of radiation-induced DNA damage of this type was registered in cells of the imaginal disks of individuals with defect in the mechanisms of DNA double-strand break repair (*окр^{A17-11}/+*), postreplicative repair, and meiotic recombination (*mei-41^{D5}/+*). The genetically unstable strains used in the work have radiosensitive features which makes them convenient models for assessing the radioecological situation in the environment.

Keywords: *Drosophila melanogaster*, irradiation, cytogenetic effects, mutations in genes for repair and antioxidant protection.

В последнее время необходимость изучения эффектов малых и сверхмалых доз ионизирующего излучения приобретает всё большую актуальность. Значимость изучения этой проблемы возросла вследствие того, что человек и биота постоянно подвержены влиянию стрессовых факторов низкой интенсивности. Использование ионизирующих излучений в медицине (изотопная диагностика, компьютерная томография, флюорография и др.), испытания ядерного оружия, воздействия ядерной промышленности и т. д. – всё это источники дополнительного облучения, вносящие существенный вклад в формирование естественного радиационного фона. Стохастичность процесса действия радиации на биологические системы, отсутствие корректной методологии в выявлении тонких изменений индуцированных низкоинтенсивным облучением цитогенетических структур делают проблематичной оценку генетического риска радиационного воздействия в малых дозах.

Анализируя имеющуюся литературу, повреждения ДНК можно отнести к биомаркерам действия ионизирующих излучений [1–5]. Радиационное воздействие на клетки приводит к образованию целого спектра разнообразных повреждений ДНК, включая двунитевые и одностранные разрывы ДНК, повреждения азотистых оснований и сахаро-фосфатного остова молекулы ДНК [6, 7]. Образование одностранных разрывов (ОР) и щелочно-лабильных сайтов (ЩЛС) происходит в результате косвенного действия ионизирующего излучения посредством индукции свободных радикалов, тогда как непосредственное воздействие кванта или частицы на хромосому приводит к возникновению двунитевых разрывов (ДР). Их количество может быть увеличено при атаке свободных радикалов – при появлении близлежащих ОР на противоположных нитях ДНК, а также при репликации и репарации [8]. Двунитевые разрывы ДНК являются основным триггером, определяющим дальнейшую судьбу клетки [7].

Клеточный ответ на воздействие ионизирующей радиации напрямую зависит от числа накопленных повреждений ДНК, типа клеток и тканей. На изменение радиочувствительности влияет как структурно-функциональная организация клеток, так и уровень функционирования защитных и компенсаторных механизмов, таких как остановка клеточного цикла, репарация и рекомбинация, апоптоз или аутофагия [9, 10]. Выяснение изменения относительного количества клеток с повреждённой

ДНК является принципиальным показателем, исследование которого позволяет сделать прогноз развития радиационно-индуцированного ответа и выживаемости клеток в клеточной популяции, подвергшейся действию ионизирующей радиации малой интенсивности. Использование радиочувствительных мутантных систем дрозофилы *in vivo* может быть также полезным для изучения молекулярных особенностей ответных реакций на действие низких доз (НД) и низких мощностей дозы (НМД). В настоящее время очень сложно выполнить точную оценку риска НД/НМД для здоровья человека. Для того, чтобы преодолеть эти ограничения, необходимы исследования о радиочувствительности животных организмов как потенциальных источников информации о механизмах, участвующих в реакциях на низкоинтенсивные воздействия радиации.

Цель настоящего исследования заключалась в определении цитогенетических реакций нестабильных по механизмам репарации и антиоксидантной защите линий дрозофилы на действие низкоинтенсивного облучения.

Объекты и методы исследования

Материалом исследования служили соматические клетки личинок третьего возраста генетически нестабильных линий *Drosophila melanogaster* с высокой (клетки имагинальных дисков) и низкой (нейробласты) пролиферацией. Облучению подвергали линию дикого типа *Canton-S* и линии с нарушениями в эксцизионной репарации нуклеотидов (*mus210^{G1}/+*), репарации двуцепочечных разрывов ДНК (*okr^{A17-11}/+*), пострепликативной репарации и мейотической рекомбинации (*mei-41^{D5}/+*), детоксикации свободных радикалов (*sodⁿ¹/+* и *sod2^{Delta02}/+*). В качестве радиационного воздействия был выбран источник гамма-излучения ²²⁶Ra (56 мГр/ч). Накопленные дозы составили 0,03–0,15 Гр. Контрольные и облучённые варианты подерживали в идентичных условиях (при температуре 25±0,1 °С и режиме освещения 12 ч/сут на стандартной питательной среде).

Изучение изменения уровня радиационно-индуцированных повреждений ДНК было проведено при помощи метода электрофореза иммобилизованных в агарозный гель единичных клеток – метода «ДНК-комет» в разных версиях рН [11]. Щелочная версия метода позволяет оценить ЩЛС и ОР, в то время как анализ в нейтральных условиях электрофореза

выявляет преимущественно ДР ДНК. В качестве критерия поврежденности ДНК был применён показатель «момент хвоста по Оливе» (ОТМ, усл. ед.) [12].

Результаты исследования были статистически обработаны в программе Statistica (версия 7.0.61.0, StatSoft, Inc., США) и представлены в виде среднего арифметического значения из серии пяти независимых экспериментов и стандартной ошибки средней ($\pm SE$). Различия средних величин между контрольными и опытными вариантами были рассчитаны по t-критерию Стьюдента. Величины угловых коэффициентов были определены с помощью линейной регрессии.

Результаты и обсуждение

Результаты оценки изменений частот простых повреждений ДНК (ЩЛС и ОР) в соматических клетках облучённых дрозофил представлены в таблице 1. Показано, что спонтанный уровень ЩЛС И ОР в клетках имагинальных дисков линии *sodⁿ¹/+* выше, чем частота повреждений такого типа в нейробластах.

Воздействие низкоинтенсивного облучения не привело к изменениям в числе клеток с ЩЛС и ОР в имагинальных дисках, за исключением дозы 0,12 Гр, при которой зарегистрирован цитогенетический эффект. Напротив, в клетках нервных ганглиев (нейробластах)

линии *sodⁿ¹/+* образование простых повреждений ДНК наблюдается практически во всём изученном диапазоне доз ионизирующего излучения. Мутанты по Мп-митохондриальной супероксиддисмутазе (*sod2^{Delta02}/+*), а также генотипы с репарационными нарушениями (кроме *mus210^{G1}/+*) не проявили статистически значимые радиационные эффекты по данному показателю. Особи *mus210^{G1}/+* с нарушениями эксцизионной репарации нуклеотидов имели повышенную частоту ЩЛС и ОР только при облучении в дозах 0,05 Гр (нейробластах) и 0,08 Гр (имагинальных дисках).

Согласно результатам, представленным в таблице 2, частоты радиационно-индуцированных ДР ДНК в клетках имагинальных дисков достоверно повышены у линий *okr^{A17-11}/+* (при облучении в дозах 0,03, 0,12 и 0,15 Гр), *mei-41^{D5}/+* (при облучении в дозах 0,08-0,15 Гр) и *mus210^{G1}/+* (при облучении в дозе 0,15 Гр). Наибольшая радиочувствительность по данному показателю была обнаружена у генотипов, имеющих нарушения в пострепликативной репарации (*mei-41^{D5}/+*) и репарации ДР ДНК (*okr^{A17-11}/+*).

В нейробластах этих генотипов высокая частота возникновения ДР была зафиксирована преимущественно при более высоких дозах низкоинтенсивного облучения. У линии *Canton-S* с нормальным функционированием систем клеточной защиты облучение в дозах 0,08 и 0,15 Гр действовало одинаково на образование повреждений ДНК, повышая их уровень. Однако доля

Таблица 1 / Table 1

Радиационно-индуцированная частота ЩЛС и ОР ДНК (ОТМ, усл. ед.) в соматических клетках *D. melanogaster* / Radiation-induced ALS and SSB DNA frequencies (OTM, arb. units) in somatic cells of *D. melanogaster*

Линия Strain	Доза облучения, Гр / Dose irradiation, Gy					
	Контроль Control	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15
<i>Canton-S</i>	<u>0,78±0,12</u> 0,87±0,10	<u>0,66±0,09</u> 0,81±0,10	<u>0,44±0,04</u> 0,61±0,09	<u>0,59±0,09</u> 0,65±0,12	<u>0,84±0,11</u> 0,70±0,11	<u>0,61±0,09</u> 0,54±0,08
<i>mus210^{G1}/+</i>	<u>0,52±0,09</u> 0,49±0,04	<u>0,71±0,13</u> 0,55±0,09	<u>1,11±0,14*</u> 0,74±0,10	<u>0,64±0,08</u> 0,94±0,12*	<u>0,78±0,12</u> 0,81±0,09	<u>0,85±0,16</u> 0,66±0,09
<i>mei-41^{D5}/+</i>	<u>0,41±0,04</u> 0,61±0,09	<u>0,74±0,05</u> 0,64±0,10	<u>0,54±0,08</u> 0,76±0,06	<u>0,46±0,06</u> 0,38±0,03	<u>0,55±0,05</u> 0,40±0,04	<u>0,74±0,10</u> 0,63±0,09
<i>okr^{A17-11}/+</i>	<u>0,63±0,09</u> 0,61±0,10	<u>0,59±0,09</u> 0,63±0,10	<u>0,39±0,08</u> 0,61±0,06	<u>0,50±0,04</u> 0,46±0,04	<u>0,61±0,09</u> 0,66±0,07	<u>0,55±0,06</u> 0,52±0,09
<i>sodⁿ¹/+</i>	<u>0,51±0,08</u> 1,21±0,22#	<u>1,31±0,16*</u> 1,43±0,24	<u>0,67±0,09</u> 1,09±0,10#	<u>0,91±0,11*</u> 1,46±0,15#	<u>0,81±0,12</u> 1,72±0,19*#	<u>1,14±0,18*</u> 1,59±0,28#
<i>sod2^{Delta02}/+</i>	<u>1,10±0,11</u> 0,99±0,12	<u>1,34±0,17</u> 0,87±0,11#	<u>0,71±0,10</u> 0,62±0,09	<u>1,03±0,15</u> 0,89±0,10	<u>0,78±0,09</u> 0,94±0,15	<u>0,89±0,11</u> 0,75±0,12

Примечание: различия достоверны при **p*<0,05 (по сравнению с контролем) и #*p*<0,05 (между ОТМ в нейробластах и имагинальных дисках), над чертой – ЩЛС и ОР ДНК в нейробластах $\pm SE$, под чертой – ЩЛС и ОР ДНК в имагинальных дисках $\pm SE$.

Note: differences are significant at **p*<0.05 (compared to control) and #*p*<0.05 (between OTM in neuroblasts and imaginal discs), above the line – ALS and SSB DNA in neuroblasts $\pm SE$, below the line – ALS and SSB DNA in imaginal discs $\pm SE$.

Таблица 2 / Table 2

Радиационно-индуцированная частота ДР ДНК (ОТМ, усл. ед.) в соматических клетках *D. melanogaster*
Radiation-induced DSB DNA frequencies (OTM, arb. units) in somatic cells of *D. melanogaster*

Линия Strain	Доза облучения, Гр / Dose irradiation, Gy					
	Контроль Control	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15
<i>Canton-S</i>	<u>0,21±0,06</u> 0,58±0,10	<u>0,48±0,08</u> 0,56±0,09	<u>0,56±0,09</u> 0,78±0,11	<u>0,89±0,13*</u> 0,99±0,17*	<u>0,54±0,10</u> 0,62±0,07	<u>0,94±0,09*</u> 1,08±0,11*
<i>mus210^{G1}/+</i>	<u>0,37±0,05</u> 0,58±0,09	<u>0,47±0,11</u> 0,52±0,09	<u>0,26±0,06</u> 0,34±0,06	<u>0,50±0,08</u> 0,47±0,09	<u>0,89±0,09*</u> 0,51±0,08	<u>1,57±0,12*</u> 2,11±0,24*#
<i>mei-41^{D5}/+</i>	<u>0,42±0,04</u> 0,57±0,08	<u>0,44±0,09</u> 0,64±0,10	<u>0,54±0,08</u> 0,50±0,07	<u>1,07±0,14*</u> 1,43±0,23*	<u>1,37±0,12*</u> 1,64±0,19*	<u>1,69±0,11*</u> 2,95±0,25*#
<i>okr^{A17-11}/+</i>	<u>0,48±0,09</u> 0,62±0,09	<u>0,72±0,15</u> 1,33±0,35*#	<u>0,54±0,11</u> 0,65±0,09	<u>0,61±0,13</u> 0,81±0,12	<u>0,47±0,07</u> 1,02±0,11*#	<u>1,21±0,15*</u> 1,74±0,33*#
<i>sodⁿ¹/+</i>	<u>0,30±0,04</u> 0,45±0,09	<u>0,48±0,07</u> 0,60±0,08	<u>0,58±0,09</u> 0,51±0,10	<u>0,47±0,09</u> 0,56±0,05	<u>0,58±0,11</u> 0,37±0,04	<u>0,52±0,08</u> 0,42±0,06
<i>sod2^{Delta02}/+</i>	<u>0,49±0,04</u> 0,44±0,08	<u>0,57±0,09</u> 0,43±0,09	<u>0,62±0,09</u> 0,55±0,08	<u>0,51±0,08</u> 0,63±0,10	<u>0,66±0,11</u> 0,51±0,08	<u>0,48±0,07</u> 0,45±0,09

Примечание: см. Таблицу 1.
Note: see Table 1.

клеток с ДР ДНК у линии *Canton-S* была ниже количества повреждённых клеток у мутантных по репарации линий.

Результаты сравнения линейных угловых коэффициентов, характеризующих прирост эффекта на единицу дозы, свидетельствуют о том, что в клетках с высокой пролиферативной активностью (имагинальных дисках) выход ДР ДНК выше примерно в два раза, чем в клетках с низкой пролиферацией (нейробластах). Исключение составляют клетки нервных ганглиев особей линии *mus210^{G1}/+*, уровень повреждений которых превышал таковой в клетках имагинальных дисков в 1,8 раза. Этот же анализ показал, что с увеличением дозы облучения образование ДР ДНК во всех клетках (независимо от пролиферативного потенциала) достоверно повышается у генотипов *mei-41^{D5}/+* с нарушениями в пострепликативной репарации. Подобная реакция была отмечена у мутантных по эксцизионной репарации особей (*mus210^{G1}/+*), но только в нейробластах.

Выявленная у некоторых исследуемых генотипов гиперрадиочувствительность обусловлена тем, что системы репарации и контроля клеточного цикла зависят от определённого порогового значения дозы радиации [13]. Дозы ниже пороговой могут не вызывать клеточную гибель, а инициировать деление облучённых клеток с невосстановленными повреждениями ДНК. Как показывают результаты, при данных дозах облучения ОР и ЩЛС не случайно распределены по геному клетки. Они возникают в сайтах с повышенной чувствительностью к повреждениям и низкой эффективностью

антиоксидантной защиты. Считают, что эти сайты располагаются в местах присоединения петель хроматина к ядерному матриксу [14].

Двунитевые разрывы ДНК рассматриваются как наиболее важные повреждения генетического материала, индуцированные низкодозовым облучением. Например, их частота возникновения в соматических клетках человека возрастает и имеет линейную зависимость при облучении в диапазоне 0,002–0,2 Гр [15]. При этом дозовые зависимости, полученные после радиационного воздействия на культуры клеток человека, существенно отличаются от регрессионных моделей «доза-эффект» у животных [15]. С использованием экспериментальных животных *in vivo* была показана немонотонная дозовая зависимость, описывающая действие малых и сверхмалых доз, при которых частоты индуцированных повреждений ДНК ниже спонтанного уровня. Такой характер дозовой кривой объясняется интенсивным функционированием репарационных систем после облучения в малых дозах [16]. Соматические клетки мутантных по репарации дрозофил оказались особенно чувствительны к действию ионизирующего излучения. Это подтверждает данные о высокой радиовосприимчивости (по уровню ДР) мутантных по репарации клеток млекопитающих, летальность которых тесно коррелировала с количеством ДР [17]. Из этого следует, что для оценки радиационной безопасности окружающей среды могут подходить экспериментальные модели животных, имеющие нарушения в репарации.

Во всём мире существуют лаборатории, использующие различные модельные системы растительного и животного происхождения для изучения радиационных эффектов и их механизмов. В исследовании [18] с помощью кометного теста была обнаружена высокая радиочувствительность у растений с большим размером генома. У них так же, как и у млекопитающих была зафиксирована способность к дифференциальной репарации. Недавно была сформулирована концепция «перцептрона», в которой гены и белки рассматриваются как технологические единицы с биохимическими связями [19]. Благодаря этим единицам включается система обработки информации, способная выбрать подходящую стратегию функционирования внутриклеточных процессов в изменяющихся условиях окружающей среды. На сегодняшний день известны некоторые гены репарации, нарушения в работе которых приводят к гиперрадиочувствительности. Так, например, в норме гены *ATM/ATR* человека и млекопитающих, а также гомологичный им ген дрозофилы *mei-41* контролируют передачу сигналов о повреждении ДНК и последующую их репарацию [5]. У линии дикого типа *D. melanogaster* в ответ на облучение в малых дозах (0,05–0,2 Гр) может происходить сверхэкспрессия генов *mei-9*, *mei-41* и *mus309* [20]. В настоящем исследовании соматические клетки мутантных по репарации особей *mei-41^{D5}/+* и *okr^{A17-11}/+* оказались наиболее радиочувствительными. Сегодня активно обсуждаются преимущества и ограничения в применении стандартных цитогенетических методов с учётом потребности в новых биомаркерах, позволяющих оценивать дозы облучения и лучше прогнозировать последствия для здоровья человека и решать вопросы индивидуальной радиочувствительности. Используемый метод «ДНК-комет» проявил себя как чувствительный метод, способный выявить радиационно-индуцированные повреждения ДНК как в пролиферирующих, так и слабо пролиферирующих клетках.

Заключение

Проведена оценка зависимости выхода повреждений ДНК в клетках с разной пролиферативной активностью мутантных линий дрозофилы в широком диапазоне поглощённых доз (0,03–0,15 Гр) низкоинтенсивного ионизирующего излучения. На характер зависимости выхода повреждений ДНК от дозы облучения в соматических клетках влияют генотипические

особенности животных. В клетках с высокой пролиферацией (имагинальных дисках) выход радиационно-индуцированных повреждений ДНК выше примерно в 1,6–16,6 (однонитевые разрывы и щелочно-лабильные сайты) и 2 (двунитевые разрывы) раза, чем в малопродлиферирующих клетках (нейробластах). Полученные данные свидетельствуют, что использование высоко пролиферативных систем модельных животных с нарушениями в определённых механизмах репарации ДНК и антиоксидантной защиты является многообещающим способом для изучения реакции на облучение в малых дозах. Такой подход может стать полезным в систематических разработках точных биомаркеров для оценки экологических рисков, а также для клинического использования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по темам «Генетические и функциональные исследования эффектов геронпротекторных интервенций на модели *Drosophila melanogaster*» (№ 12204060022-1) и «Действие ионизирующего излучения и факторов не радиационной природы на биологические объекты и биогенная миграция тяжёлых естественных радионуклидов» (№ 12204060024-5).*

References

1. Asaithamby A., Chen D.J. Cellular responses to DNA double-strand breaks after low-dose gamma-irradiation // *Nucleic Acids Research*. 2009. V. 37. P. 3912–3923. doi: 10.1093/nar/gkp237
2. Little M.P., Wakeford R., Tawn E.J., Bouffler S.D., Berrington de Gonzalez A. Risks associated with low doses and low dose rates of ionizing radiation: why linearity may be (almost) the best we can do // *Radiology*. 2009. V. 251. P. 6–12. doi: 10.1148/radiol.25111081686
3. Bach J., Peremarti J., Annangi B., Marsor R., Hernandez A. Reduced cellular DNA repair capacity after environmentally relevant arsenic exposure. Influence of *Ogg1* deficiency // *Mutation Research*. 2015. V. 779. P. 144–151. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2015.07.004
4. Jayakumar S., Pal D., Sandur S.K. Nrf2 facilitates repair of radiation induced DNA damage through homologous recombination repair pathway in a ROS independent manner in cancer cells // *Mutation Research*. 2015. V. 779. P. 33–45. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2015.04.035
5. Nikitakia Z., Holác M., Donàd M., Pavlopoulou A., Michalopoulos I., Angelisc K.J., Georgakilasa A.G., Macoveig A., Balestrazz A. Integrating plant and animal biology for the search of novel DNA damage biomarkers // *Mutation Research-Reviews in Mutation Research*. 2018. V. 775. P. 21–38. doi: 10.1016/j.mrrev.2018.01.001

6. Mullenders L., Atkinson M., Paretzke H., Sabatier L., Bouffler S. Assessing cancer risks of low-dose radiation // Nature Reviews Cancer. 2009. V. 9. P. 596–604. doi: 10.1038/nrc2677
7. Barnard S., Bouffler S., Rothkamm K. The shape of the radiation dose response for DNA double-strand break induction and repair // Genome Integrity. 2013. V. 4. No. 1. P. 1–8. doi: 10.1186/2041-9414-4-1
8. Banáth J.P., Klokov D., MacPhail S.H., Banuelos C.A., Olive P.L. Residual γ H2AX foci as an indication of lethal DNA lesions // BMC Cancer. 2010. V. 10. No. 4. P. 2–12. doi: 10.1186/1471-2407-10-4
9. Rodriguez-Rocha H., Garcia-Garcia A., Panayiotidis M., Franco R. DNA damage and autophagy // Mutat. Res. 2011. V. 711. No. 1-2. P. 158–166.
10. Dekanty A., Barrio L., Milán M. Contributions of DNA repair, cell cycle checkpoints and cell death to suppressing the DNA damage-induced tumorigenic behavior of *Drosophila* epithelial cells // Oncogene. 2015. V. 34. P. 978–985. doi: 10.1038/onc.2014.42
11. Bilbao C., Ferreiro J.A., Comendador M.A., Sierra L.M. Influence of *mus201* and *mus308* mutations of *Drosophila melanogaster* on the genotoxicity of model chemicals in somatic cells *in vivo* measured with the Comet assay // Mutation Research. 2002. V. 503. No. 1. P. 11–19. doi: 10.1016/s0027-5107(02)00070-2
12. Olive P.L. DNA damage and repair in individual cells: applications of the comet assay in radiobiology // International Journal Radiation Biology. 1999. V. 75. P. 395–405. doi: 10.1080/095530099140311
13. Marples B., Wouters B.G., Joiner M.C. An association between the radiation-induced arrest of G2-phase cells and low-dose hyper-radiosensitivity: a plausible underlying mechanism? // Radiation Research. 2003. V. 160. P. 38–45. doi: 10.1667/rr3013
14. Pemov A., Bavykin S., Hamlin J.L. Attachment to the nuclear matrix mediates specific alterations in chromatin structure // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 1998. V. 95. P. 14757–14762. doi: 10.1073/pnas.95.25.14757
15. Rothkamm K., Lobrich M. Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2003. V. 100. P. 5057–5062. doi: 10.1073/pnas.0830918100
16. Azzam E.I., de Toledo S.M., Raaphorst G.P., Mitchel R.E. Low-dose ionizing radiation decreases the frequency of neoplastic transformation to a level below the spontaneous rate in *C3H10T1/2* Cells // Radiation Research. 1996. V. 146. P. 369–373.
17. Billen D. Spontaneous DNA Damage and Its Significance for the “Negligible Dose” Controversy in Radiation Protection // Radiation Research. 1990. V. 124. P. 242–245.
18. Einset J., Collins A.R. Genome size and sensitivity to DNA damage by X-rays-plant comets tell the story // Mutagenesis. 2018. V. 33. P. 49–51. doi:10.1093/mutage/gex029
19. Scheres B., van der Putten W.H. The plant perceptor connects environment to development // Nature. 2017. V. 543. P. 337–345. doi: 10.1038/nature22010
20. Zhikrevetskaya S., Peregudova D., Danilov A., Plyusnina E., Krasnov G., Dmitriev A., Kudryavtseva A., Shaposhnikov M., Moskalev A. Effect of low doses (5–40 sGy) of gamma irradiation on lifespan and stress-related genes expression profile in *Drosophila melanogaster* // PLoS ONE. 2015. V. 10. P. e0133840. doi: 10.1371/journal.pone.0133840

Некоторые закономерности накопления микроэлементов в листьях липы (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы (*Betula alba* L.)

© 2024. А. В. Горбунов¹, с. н. с.,
Д. Б. Петренко^{1,2}, к. х. н., н. с.,
А. А. Дронова¹, м. н. с.,

¹Геологический институт Российской академии наук,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 1,

²Государственный университет просвещения,
141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
e-mail: anatolygor@yandex.ru

Изучены закономерности фонового накопления микроэлементов в течение одного вегетационного сезона в листьях липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.). Образцы отбирали на территории Главного Ботанического сада РАН в течение весенне-летне-осеннего сезона 2018 г. с одного и того же дерева с промежутком 10–12 дней, начиная с раскрытия почки (конец апреля) непосредственно вплоть до времени листопада (конец сентября – начало октября). Также отбирали образцы почвы в местах произрастания берёзы и липы. Анализ образцов осуществлялся в лаборатории химико-аналитических методов ГИН РАН при помощи комплекса аналитических методов, состоящего из рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) и атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара (АА). Показано, что концентрация микроэлементов в отобранных образцах почвы соответствует понятию «фоновых» содержаний. Первый тип – равномерное накопление микроэлементов с максимумом в конце сезона (Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La). Второй тип распределения характеризуется максимумом концентрации микроэлементов в середине сезона с уменьшением концентрации к моменту листопада (K, As, Zn, Cd, Pb). Следует отметить, что диапазон изменения концентрации микроэлементов в течение сезона в обоих случаях может достигать 10–15 раз. Рекомендовано производить отбор образцов растительности (листьев) в максимально сжатые сроки в середине летнего сезона, в качестве «фоновых» желательно использовать образцы, отобранные в этих же временных рамках в этой же местности.

Ключевые слова: микроэлементы, накопление, вегетативные органы, высшие растения.

Some patterns of the accumulation of trace elements in the leaves of linden (*Tilia cordata* Mill.) and birch (*Betula alba* L.)

© 2024. A.V. Gorbunov¹ ORCID: 0000-0001-7794-100X³
D. B. Petrenko^{1,2} ORCID: 0000-0003-0640-5159³
A. A. Dronova¹ ORCID: 0000-0002-1232-9765³

¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
bld. 1, 7, Pyzhevsky Lane, Moscow, Russia, 119017,

² Federal state university of education,
24, Very Voloshinoy St., Mytishi, Russia, 141014,
e-mail: DBPetrenko@yandex.ru

The purpose of the work: to study the patterns of background accumulation of trace elements during the spring-summer-autumn season in the vegetative organs (leaves) of the heart-shaped linden (*Tilia cordata* Mill.) and white birch (*Betula alba* L.). Samples were taken on the territory of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences during one season of 2018 from the same tree with an interval of 10–12 days, starting from the opening of the bud (end of April) right up to the time of leaf fall. Soil samples were also taken from birch and linden growing areas. The samples were analyzed in the laboratory of Chemical analytical methods of the GIN RAS using X-ray fluorescence analysis (XRF), instrumental neutron activation analysis (INAA) and atomic absorption spectrometry of cold vapor (AA). The concentration of trace elements in the selected soil samples corresponds to the concept of “background” contents. Two types of trace elements’ distribution in linden and birch leaves during the season have been revealed. The first type is a uniform accumulation of trace elements with a maximum at the end of the season (Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La). The

second type of distribution is characterized by a maximum concentration of trace elements in the middle of the season with a decrease in concentration by the time of leaf fall (K, As, Zn, Cd, Pb). It should be noted that the range of changes in the concentration of trace elements during the season in both cases can reach 10–15 times. We recommend to take samples of vegetation (leaves) as soon as possible in the middle of the summer season, and to use samples taken at the same time in the same area as “background”.

Keywords: trace elements, accumulation, vegetative organs, higher plants.

Микроэлементный состав растений в целом отражает элементный состав среды произрастания, что многократно продемонстрировано для целого ряда растений урбанизированных территорий [1–7]. Однако на эту закономерность оказывают влияние множество различных факторов: реакция среды, температура, аэрация, окислительно-восстановительный потенциал почвы, вид растений и т. д. Поэтому зависимость между концентрацией макро- и микроэлементов в почве и поступлением их в растения часто не носит определённого функционального характера. Следует отметить, что практически все экологические и биогеохимические исследования основаны на предположении, что микроэлементный состав для каждого вида растений, при отсутствии техногенных воздействий, является величиной относительно постоянной. Считается, что уровни природных «фоновых» концентраций микроэлементов для данного вида растительности могут изменяться в пределах 30–50%. Однако данные, приведённые в литературных источниках, показывают, что диапазон колебаний концентрации микроэлементов в течение одного сезона может составлять до 100% и более [8–12]. Эти данные позволяют предположить, что наряду с ландшафтно-геохимическими условиями и видовой специализацией растительности, на микроэлементный состав вегетативных органов растений влияет также так называемый сезонный фактор – то есть непосредственно время отбора образцов.

Целью нашей работы была оценка закономерностей фонового накопления микроэлементов в листьях наиболее распространённых в средней полосе России растений на примере липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.) в течение вегетативного сезона.

Объект и методы исследования

Отбор образцов. В качестве объекта для исследования «фоновое» распределение микроэлементов были взяты листья липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и берёзы белой (*Betula alba* L.), произраставших в одинаковых ландшафтно-геохимических условиях.

Место отбора образцов располагалось на территории Главного Ботанического сада РАН. Ботанический сад расположен в северной части территории Москвы. Средняя продолжительность вегетационного периода 180 дней, среднегодовая температура +3,6 °С. По существующим критериям эколого-геохимической оценки состояния окружающей среды район является относительно чистым: в радиусе 3 км промышленные предприятия отсутствуют.

На протяжении одного сезона 2018 г. с одного и того же растения, с промежутком 10–12 дней, начиная с раскрытия почки (конец апреля), отбирали образцы листьев. Весной и осенью периодичность отбора образцов изменялась до одного раза в неделю. Отбор образцов проводился с периферийных частей веток на расстоянии от земли 1,5–2 м. Отбирали также образцы почвы в местах произрастания берёзы и липы (почва дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая). Отбор образцов почвы проводился 3 раза за сезон – весной, в середине лета и осенью. Всего отобрано около 60 образцов.

Анализ образцов. Отобранные образцы листьев дважды промывали дистиллированной водой для удаления поверхностного загрязнения листьев. Далее образцы высушивали до постоянной массы при комнатной температуре (20 °С) и измельчали с помощью лабораторной мельницы Stegler LM-250 (Stegler, Китай). Почву также высушивали при комнатной температуре и пропускали через сито с размером ячеек 1 мм. Анализ образцов осуществлялся в лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН (г. Москва), использовался комплекс методов, состоящий из нейтронно-активационного (ИНАА), рентгеноспектрального (РФА) и атомно-абсорбционного метода с «холодным» паром (АА ХП). Для определения концентрации Cu и Pb в растительных объектах использовали атомно-абсорбционный метод (АА).

Рентгеноспектральный анализ почвы проводился с использованием последовательного волнового XRF спектрометра «S4 Pioneer» Bruker AXS. Обработка полученных результатов осуществлялась с помощью пакета программ «S4 Spectra Plus».

Инструментальный нейтронно-активационный анализ листьев липы и берёзы проводился на исследовательском реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ с помощью спектрометра на основе детектора из сверхчистого германия большого объёма фирмы «Canberra» с энергетическим разрешением 1,3 кэВ по линии 1332 кэВ Co^{60} . Определение концентрации ртути проводили методом атомной абсорбции с «холодным» паром, использовался анализатор ртути «Юлия-5К» (НПО «Метрология», Россия). Атомно-абсорбционный анализ осуществлялся с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2А» (Москва, КОРТЭК), укомплектованного дейтериевым корректором неселективного поглощения и соответствующими лампами полого катода.

Контроль качества результатов анализа проводили с помощью анализа «холостых»

проб, контрольных образцов и стандартных образцов состава отечественного производства, МАГАТЭ и NIST. Анализ всех образцов проводился в соответствии с утверждёнными в РФ методиками, анализ подвижных форм в почве проводился в соответствии с РД 52.18.289-90.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены концентрации микро- и макроэлементов в почве. Эти данные показывают, что содержание приведённых в таблице элементов в почве ниже кларковых значений, значительно ниже ПДК (ОДК), как по «валовым» значениям, так и по подвижным формам. Таким образом, изученные почвы можно отнести к «фоновым», не обладающим аномальными концентрациями компонентов.

Таблица 1 / Table 1
Концентрация микро- и макроэлементов в почве в пересчёте на воздушно-сухую массу
Concentration of trace and macroelements in soil, air-dry weight

Элемент Element	Ед. изм. Unit	Среднее содержание в почвах мира [12] World-soil average [12]	Средняя концентрация Average concentration	Валовые концентрации, мин-макс Total concentration, min-max	Подвижные формы, мин-макс Labile forms, min-max	ПДК (ОДК)* MPC (UEC)*	
						Валовые концентрации Total concentrations	Подвижная форма Movable form
Na	масс. % wt. %	–	1,93	1,81–2,02	–	–	–
K		–	1,27	1,11–1,35	–	–	–
Ca		–	1,25	1,15–1,36	–	–	–
Fe		–	1,77	1,71–1,82	–	–	–
Cr	мг/кг mg/kg	59,5	15	11–21	0,3–0,5	100	–
Co		11,3	5,8	5,3–6,2	0,5–1,13	–	5
Cu		38,9	9,8	9,3–10,6	1,4–4,9	132	3
Zn		70	40	32–45	5,1–9,3	220	23
As		6,83	1,4	0,73–1,88	–	10	–
Br		10	2,04	1,56–2,77	–	–	–
Rb		68	46	39–52	–	–	–
Cd		0,41	0,4	0,2–0,6	0,05–0,2	2	–
Sb		0,67	0,11	0,09–0,13	–	4,5	–
Ba		460	387	333–410	–	–	–
La		27	6,2	5,2–8,1	–	–	–
Ce		56,7	13,4	13,4–15,5	–	–	–
Hg		0,07	0,025	0,021–0,029	–	2,1	–
Pb		27	9,9	9–12,2	1,1–3,5	130	6
Th		9,2	1,84	1,11–2,12	–	–	–

Примечание: *ПДК (ОДК) – согласно СанПиН 1.2.3685-21; «–» – нет данных.
Note: *MPC (UEC) – according to SanPiN 1.2.3685-21; “–” – no data available.

Таблица 2 / Table 2

Концентрация микроэлементов в листьях липы и берёзы в пересчёте на воздушно-сухую массу
Concentration of trace elements in linden and birch leaves, air-dry weight

Элемент Element	Ед. изм. Unit	Объект / Object						Норма Standard
		Липа (<i>Tilia cordata</i>) Linden tree			Берёза (<i>Betula alba</i> L.) Birch			
		$C_{av.}^*$	Диапазон концентраций, мин-макс Concentration range, min-max	S^{**}	$C_{av.}$	Диапазон концентраций, мин-макс Concentration range, min-max	S	
K	%	1,73	0,5–3,01	0,80	1,31	0,65–2,33	0,54	–
Ca		2,20	0,7–3,9	1,20	1,93	0,88–2,54	0,65	–
Na	мг/кг mg/kg	159	75–300	68,3	109	45–213	48,5	–
Cr		1,89	0,5–5,9	1,56	0,74	0,33–4,2	0,23	0,2–1,0
Fe		163	50–380	114	159	98–260	98	–
Co		0,34	0,05–0,71	0,15	0,35	0,06–0,77	0,15	0,02–1,0
Cu		6,30	5,31–12,8	3,85	11	6,61–18	4,62	2–30
Zn		28,4	21–52	12,6	27,3	22–49	11,9	15–150
As		0,38	0,05–0,91	0,25	0,48	0,11–1,01	0,11	0,1–1,7
Rb		8,39	3,1–25	2,61	9,2	3,3–15	3,56	–
Br		1,49	0,5–3,8	1,01	2,16	0,83–3,9	1,11	–
Cd		0,08	0,073–0,12	0,05	0,06	0,04–0,11	0,04	0,05–0,2
Sb		0,14	0,05–0,31	0,08	0,09	0,04–0,25	0,05	0,06–7
Ba		32,3	20–48	9,30	94	35–129	25	–
La		0,47	0,2–1,4	0,34	0,16	0,08–0,25	0,07	–
Ce		0,90	0,4–2,4	0,59	0,42	0,14–0,44	0,15	–
Hg		0,015	0,011–0,03	0,009	0,012	0,009–0,022	0,009	0,005–0,01
Th		0,09	0,02–0,18	0,055	0,05	0,03–0,012	0,025	–
Pb	0,78	0,65–1,12	0,48	0,33	0,12–0,65	0,15	0,1–5	

Примечание: $*C_{av.}$ – средняя концентрация, $**S$ – стандартное отклонение, «–» – нет данных.
Note: $*C_{av.}$ – average concentration, $**S$ – standard deviation, “–” – no data available.

В таблице 2 приведены данные о концентрации микроэлементов в отобранных образцах листьев липы и берёзы. В целом эти значения укладываются в понятие нормальных [12–15] значений. Оценка минимальных и максимальных содержаний показывает весьма большой разброс данных в зависимости от момента сбора в течение сезона. В среднем этот разброс составляет 5–7 раз, а по отдельным элементам, таким как Cr, As, Sb – в 10 и более раз.

Это свидетельствует о существовании определённых закономерностей в распределении микроэлементов в течение сезона. Для оценки этих закономерностей были построены графики изменения концентрации микроэлементов в листьях липы и берёзы в зависимости от времени отбора образцов. Эти графики представлены на рисунках 1 и 2. Графики и уравнения, представленные на этих рисунках, указывают на прямо пропорциональный

характер распределения определённой группы микроэлементов в листьях липы в течение весенне-летне-осеннего сезона.

В этой группе элементов наблюдается достаточно равномерное накопление элементов в листьях липы в течение сезона. Максимальные уровни содержания химических элементов отмечены перед листопадом. Такого рода распределение характерно для подавляющего большинства приводимых химических элементов и связано, видимо, с концентрацией их в старых клетках растения. На рисунке 1 эта группа элементов представлена Na, Fe, Ca и Cr, на рисунке 2 представлены только Na и Fe, так как распределение Ca и Cr в листьях берёзы идентично графикам рисунка 1. Следует отметить, что к этой же группе элементов с подобным распределением относятся также Co, Br, Sb, La и Ce. Величина коэффициента детерминации ($R^2=0,50–0,79$) показывает, что выбранная модель распределения (линия

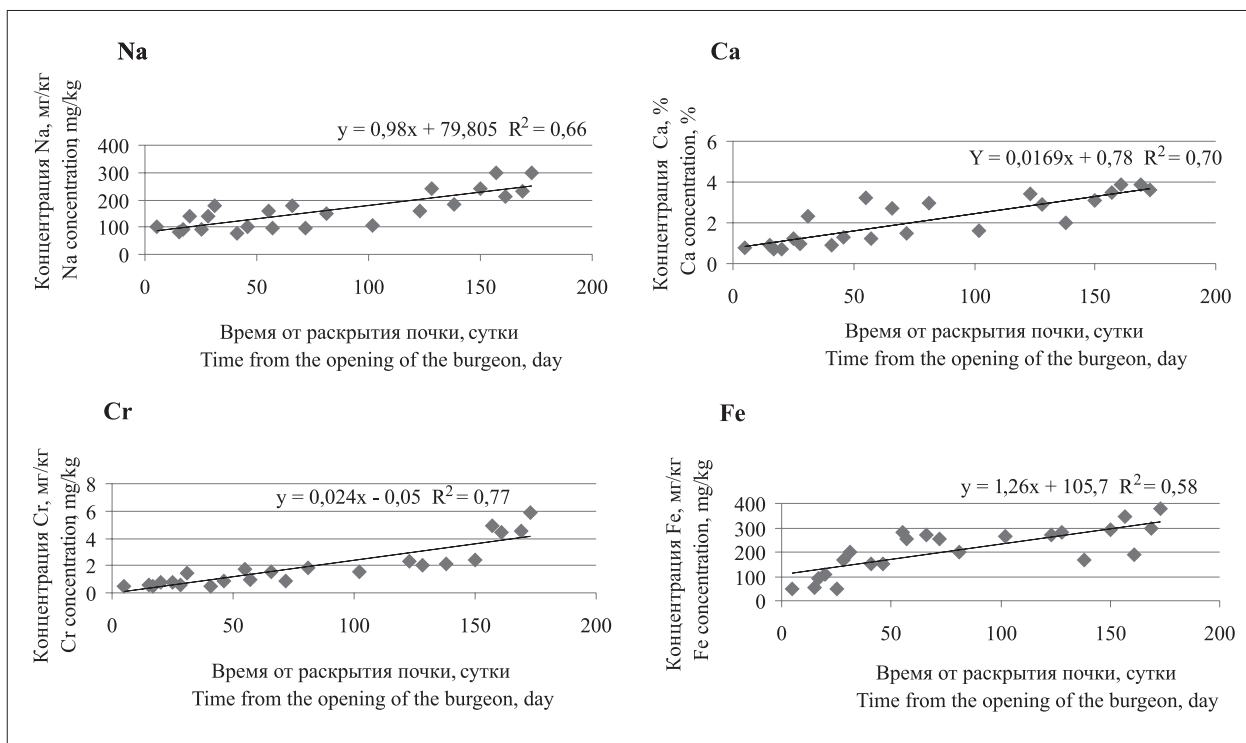


Рис. 1. Изменение концентрации Na, Ca, Fe и Cr в листьях липы в течение вегетативного сезона
Fig. 1. Changes in Na, Ca, Fe and Cr concentrations in linden leaves during the vegetative season

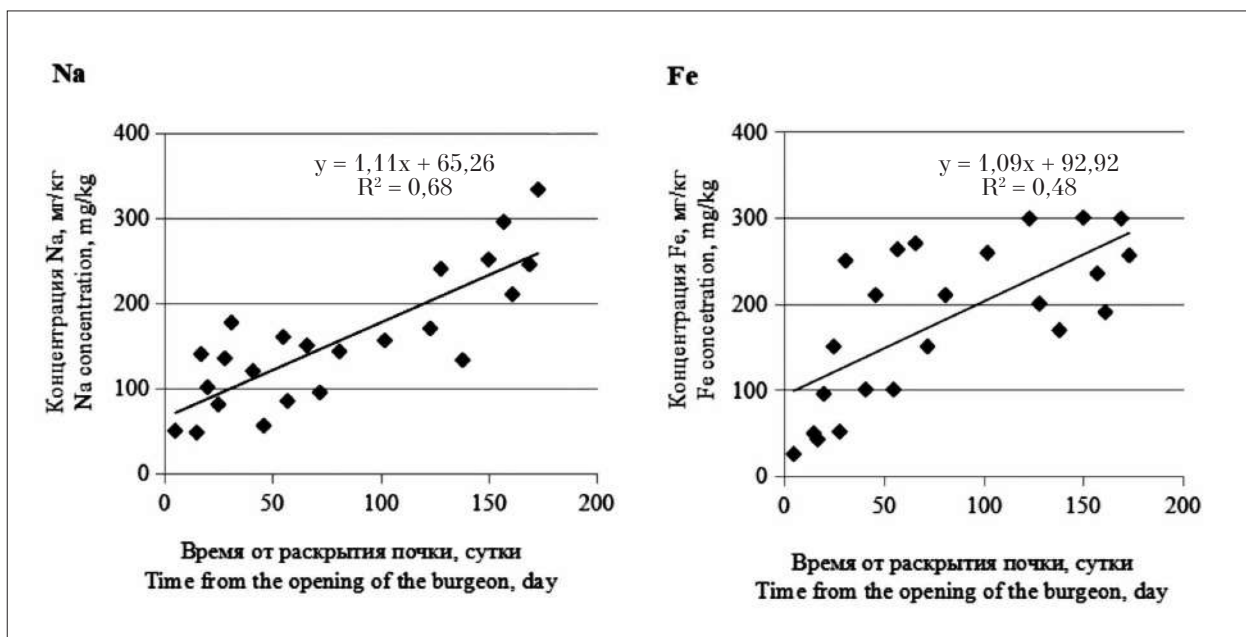


Рис. 2. Изменение концентрации Na и Fe в листьях берёзы в течение вегетативного сезона
Fig. 2. Changes in Na and Fe concentrations in birch leaves during the vegetative season

тренда) имеет характер приемлемого качества, т. е. характер распределения можно признать достоверным.

На рисунках 3 и 4 приведены графики распределения K, Zn, As, Cd и Pb в листьях липы и берёзы в течение весенне-летне-

осеннего сезона. Графики и уравнения, приведённые на этом рисунке, указывают на полиномиальный характер распределения концентрации данных микроэлементов. Распределение этих элементов в листьях имеет два минимума и один максимум концентрации.

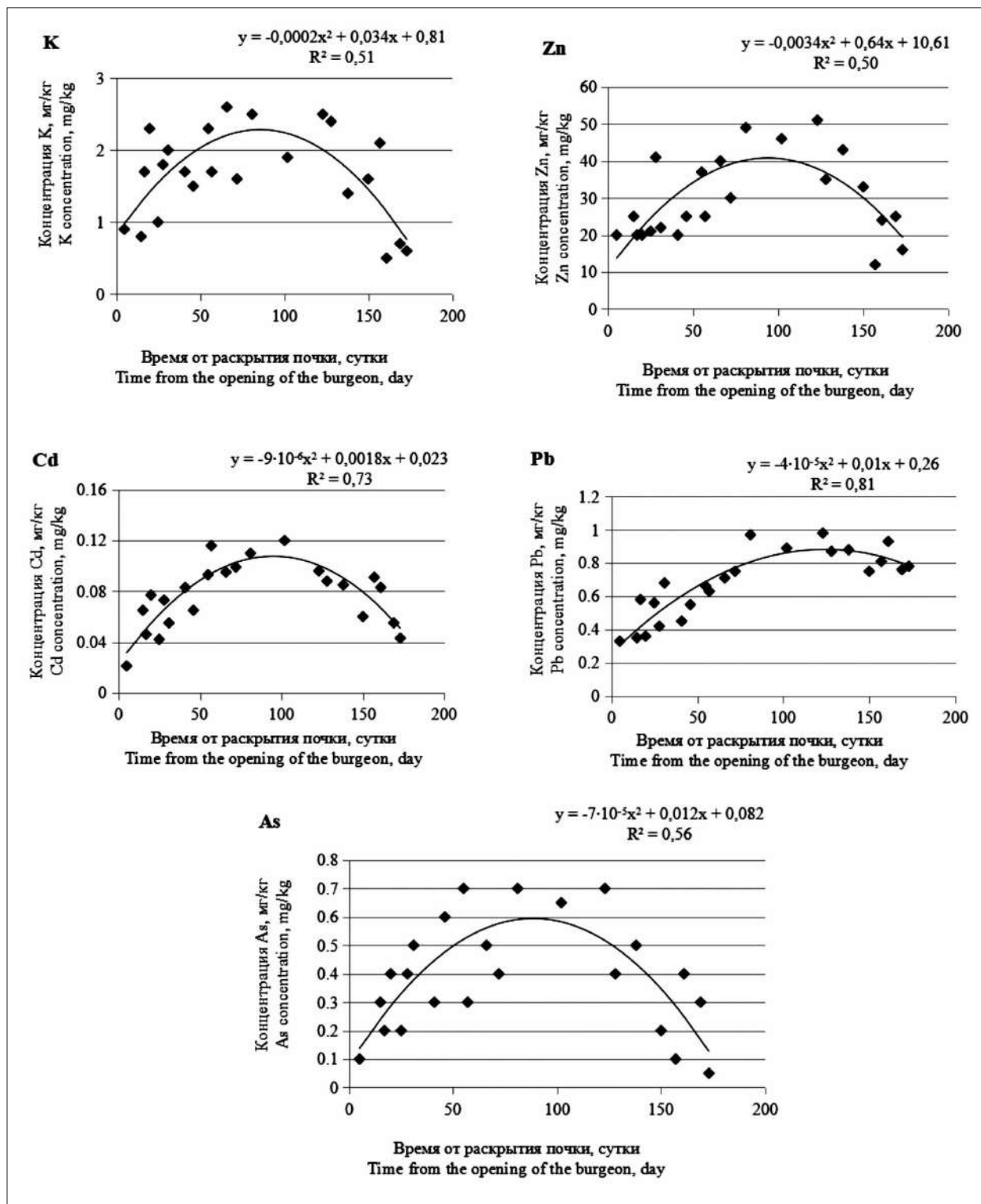


Рис. 3. Изменение концентрации K, Zn, Pb, Cd и As в листьях липы в течение вегетативного сезона
 Fig. 3. Changes in K, Zn, Pb, Cd and As concentrations in linden leaves during the vegetative season

Минимумы характерны для начала сезона (раскрытие почки) и для конца сезона (опад листьев), максимум приурочен к середине сезона. Величина коэффициента детерминации находится в рамках модели приемлемого качества. Парадоксально то, что в одной модели

распределения объединены такие жизненно важные элементы, как K, Zn и токсичные элементы As, Cd, Pb.

Следует отметить, что при анализе распределения микроэлементов в листьях берёзы и липы получены сопоставимые результаты

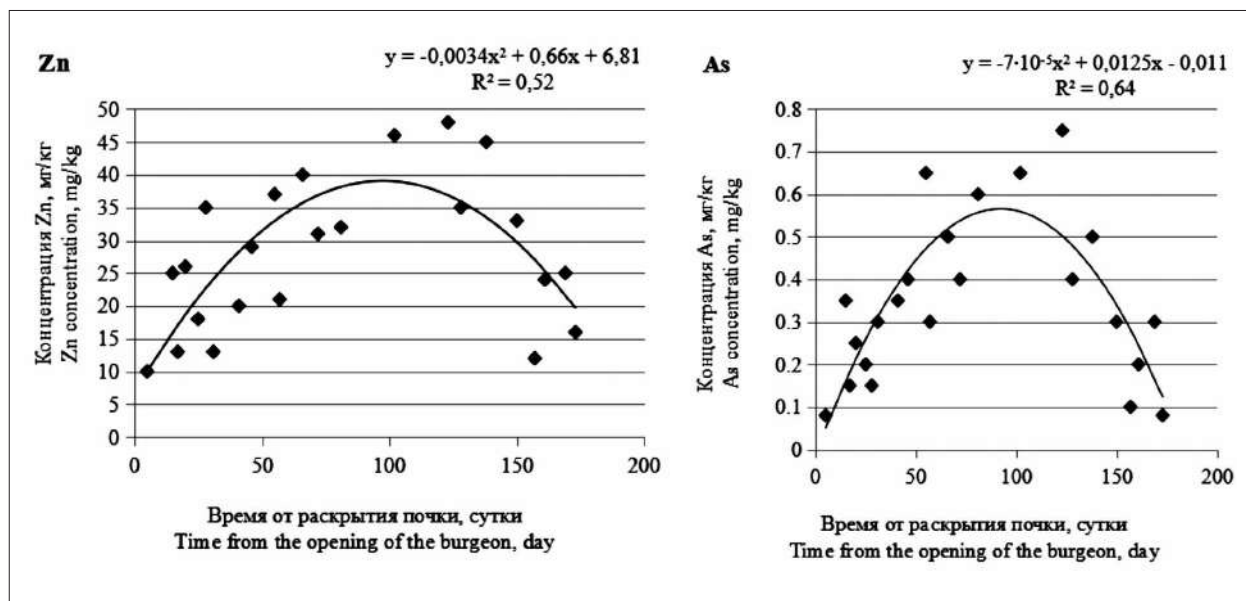


Рис. 4. Изменение концентраций Zn и As в листьях березы в течение вегетативного сезона
 Fig. 4. Changes in Zn and As concentrations in birch leaves during the vegetative season

как по характеру распределения, так и по набору микроэлементов.

Данные, приведённые выше, показывают, что концентрация различных элементов в листьях, отобранных в различное время сезона, может различаться в 3–10 раз. Это различие определяется двумя разными алгоритмами накопления микроэлементов в листьях. Для одной группы элементов – это линейное накопление до момента опадания листьев, для другой группы элементов – это накопление до максимума в середине сезона с последующим выносом элемента до минимума к моменту опадания. Отбор образцов листьев без учёта этих особенностей может привести к значительным ошибкам в анализе экологической ситуации в районе исследований.

Выводы

В процессе проведения данной работы были выявлены некоторые закономерности распределения микроэлементов в листьях липы и берёзы в зависимости от фазы вегетации. Эти закономерности выражаются в линейном накоплении листьями липы и берёзы Na, Ca, Cr, Fe, Co, Br, Sb, La с максимумом в конце сезона. Накопление K, As, Zn, Cd, Pb имеет принципиально другой характер с максимумом концентрации в середине летнего сезона с уменьшением концентрации к моменту опадания листьев. Диапазон изменения концентраций в течение сезона достаточно велик и может достигать 10 раз и более. Эти закономерности необходимо учитывать при

проведении экологических и мониторинговых исследований при использовании листьев липы и берёзы и, возможно, других высших растений. В противном случае возможны значительные ошибки в интерпретации результатов исследования. Избежать этих ошибок позволят следующие рекомендации:

а) отбор всего объёма образцов необходимо проводить в максимально сжатые сроки в середине летнего сезона;

б) в качестве «фона» необходимо использовать образцы, отобранные в эти же сроки в этой же местности.

Литература

1. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 27–32. doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-027-032
2. Дабах Е.В., Кислицына А.П., Домнина Е.А. Сравнительное изучение содержания микроэлементов в системе почва – растения луговых биоценозов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 139–146. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-139-146
3. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П. Оценка загрязнения почв и растений в зоне воздействия газовой запылённости выбросов алюминиевого завода // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 64–68. doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068
4. Сухарева Т.А. Элементный состав листьев древесных растений в условиях техногенного загрязнения // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 3. С. 369–376.

5. Роева Н.Н., Воронич С.С., Хлопаев А.Г., Зайцев Д.А., Воронич Н.С. Исследование динамики накопления подвижных форм тяжёлых металлов, бенз(а)-пирена и нефтепродуктов в почвах урбанизированных территорий // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 8. С. 39–43. doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-39-43

6. Akhtaeva N., Boribay E., Nurmakhanova A., Tynybekov B., Moldagazyeva Z. Adaptive characteristics of plants in the conditions of technogenic pollution // Journal of water and land development. 2022. No. 55. P. 251–258. doi: 10.24425/jwld.2022.142328

7. Медведева М.В., Титова Т.С., Бахмет О.Н., Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. Исследование влияния аэротехногенного загрязнения на накопление тяжёлых металлов в системе растение – почва // Экология и промышленность России. 2019 Т. 23. №. 6. С. 52–57. doi: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57

8. Gill M. Heavy metal stress in plants: a review // Int. J. Adv. Res. 2014. V. 2. No. 6. P. 1043–1055.

9. Vanghele N.A., Pruteanu M.A., Petre A.A., Matache A., Mihalache D.B., Stanciu M.M. The influence of environmental factors and heavy metals in the soil on plants' growth and development // E3S Web Conf. 2020. V. 180. Article No. 03014. doi: 10.1051/e3sconf/202018003014

10. Senchenko M., Pozdnyakova V., Stepanova M., Olenchuk E. Migration of microelements and heavy metals in the system “soil – plant – plant-based products” // J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci. 2021. V. 10. No. 6. Article No. e3169. doi: 10.15414/jmbfs.3169

11. Винокуров С.Ф., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., А.Б. Лексин, Шевченко А.В., Долов С.М., Дударов З.И., Гурбанова О.А. Сезонные колебания концентраций макро- и микроэлементов и формы их миграции в поверхностных водоёмах в районе деятельности Тырнаузского вольфрамово-молибденового комбината (Кабардино-Балкарская Республика, РФ) // Вестник ВНИЦ. 2016. Т. 16. № 2. С. 55–63.

12. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press Inc., 2010. 548 p. doi: 10.1201/b10158

13. Богачев А.В. Миграция ¹³⁷Cs и калия в системе «почва-растение». Факты, закономерности, гипотезы. Препринт № ИБРАЕ-97-20. М.: ИБРАЭ РАН, 1997. 35 с.

14. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Фронтасьева М.В., Гундорина С.Ф. Сезонные изменения микроэлементного состава вегетативных органов древесной растительности // Экологическая химия. 2005. Т. 14. № 4. С. 258–265.

15. Jayasankar R., Paliwar K. Seasonal variation in the elemental composition of *Gracilaria* species of the Gulf of Mannar, Tamil Nadu coast // Seaweed Res. Utiln. 2002. V. 24. No. 1. P. 55–59.

References

1. Mikhailova T.A., Shergina O.V. Biogeochemical migration of pollutant elements in an urban ecosystem // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 3. P. 27–32 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-027-032

2. Dabakh E.V., Kislitsyna A.P., Domnina E.A. Comparative study of the content of trace elements in the system soil – plants of meadow biocenoses // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 139–146 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-139-146

3. Evdokimova G.A., Mozgova N.P. Comparative estimation of soil and plant pollution in the impact area of air emissions from an aluminium plant after technogenic load reduction // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 64–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068

4. Sukhareva T.A. Elemental composition of the leaves of wood plants under the conditions of technogenic pollution // Chemistry for Sustainable Development. 2012. V. 20. No. 3. P. 369–376 (in Russian).

5. Roeva N.N., Voronich S.S., Khlopaev A.G., Zaitsev D.A., Voronich N.S. Investigation of the dynamics of accumulation of mobile forms of heavy metals, benz-(a)-pyrene and petroleum products in soils of urbanized territories // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 8. P. 39–43 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-39-43

6. Akhtaeva N., Boribay E., Nurmakhanova A., Tynybekov B., Moldagazyeva Z. Adaptive characteristics of plants in the conditions of technogenic pollution // Journal of water and land development. 2022. No. 55. P. 251–258. doi: 10.24425/jwld.2022.142328

7. Medvedeva M.V., Titova T.S., Bakhmet O.N., Pekkoiev A.N., Kharitonov V.A. Investigation of the influence of aerotechnogenic pollution on the accumulation of heavy metals in the plant-soil system // Ecology and Industry of Russia. 2019. V. 23. No. 6. P. 52–57. doi: 10.18412/1816-0395-2019-6-52-57

8. Gill M. Heavy metal stress in plants: a review // Int. J. Adv. Res. 2014. V. 2. No. 6. P. 1043–1055.

9. Vanghele N.A., Pruteanu M.A., Petre A.A., Matache A., Mihalache D.B., Stanciu M.M. The influence of environmental factors and heavy metals in the soil on plants' growth and development // E3S Web Conf. 2020. V. 180. Article No. 03014. doi: 10.1051/e3sconf/202018003014

10. Senchenko M., Pozdnyakova V., Stepanova M., Olenchuk E. Migration of microelements and heavy metals in the system “soil – plant – plant-based products” // J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci. 2021. V. 10. No. 6. Article No. e3169. doi: 10.15414/jmbfs.3169

11. Vinokurov S.F., Kotanov A.G., Bogatnikov O.A., Gazeev V.M., Lexin A.B. Shevchenko A.V., Dolov S.M., Dударov Z.I., Kotanova O.A. The seasonal variation of macro- and minor elements concentration and forms of its migration in surface channels at the Тырнауз tungsten-molybdenum mining complex (Kabardino-Balkarian Re-

public, RF) // Vestnik VNC. 2016. V. 16. No. 2. P. 55–63 (in Russian).

12. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press Inc., 2010. 548 p. doi: 10.1201/b10158

13. Bogachev A.V. Migration of ^{137}Cs and potassium in the “soil-plant” system. Facts, patterns, hypotheses. Preprint No. IBRAE-97-20. Moskva: IPSDNE RAS, 1997. 35 p. (in Russian).

14. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Frontasyeva M.V., Gundorina S.F. Seasonal changes in the microelement composition of vegetative organs of woody vegetation // Ecological Chemistry. 2005. V. 14. No. 4. P. 258–265 (in Russian).

15. Jayasankar R., Paliwar K. Seasonal variation in the elemental composition of *Gracilaria* species of the Gulf of Mannar, Tamil Nadu coast // Seaweed Res. Utiln. 2002. V. 24. No. 1. P. 55–59.

Особенности лесных подстилок в разных типах среднетаёжных лесов

© 2024. И. А. Лиханова, к. б. н., н. с., С. В. Денева, к. б. н., н. с.,
Ю. В. Холопов, к. б. н., н. с., Е. А. Рудь, инженер,
Е. А. Скребенков, лаборант, Е. М. Лаптева, к. б. н., зав. отд. почвоведения,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

В статье представлены особенности лесных подстилок еловых, сосновых и осиновых лесов подзоны средней тайги европейского северо-востока России. Исследования подстилок проведены на территории заказника «Ляльский» (62°15' с.ш., 50°40' в.д.). Определены мощность, плотность, масса, фракционный состав и запасы углерода в лесных подстилках почв, развитых под пологом разных типов леса. Показаны возрастание влажности и запасов подстилки при переходе от незаболоченных к заболоченным типам леса, а также высокая вариабельность строения и свойств подстилок в зависимости от парцеллярности лесных биогеоценозов. В ельниках черничных запасы подстилок в зеленомошных парцеллах составляют около 49±17 т/га, сфагновых – около 77,0±1,7 т/га. В сосняках зеленомошных этот показатель в зеленомошных парцеллах составляет 54±17 т/га, а в микропонижениях варьирует от 67±15 (долгомошные парцеллы) до 101±19 (сфагновые парцеллы) т/га. В сосняках чернично-сфагновых запасы подстилок колеблются от 90±16 до 150±25 т/га, в лиственных лесах (осинники черничные) – около 60±16 т/га, с возрастанием в долгомошных парцеллах до 71±27 т/га. Запасы углерода органического в горизонтах лесных подстилок почв еловых лесов составляют около 18 тС/га, сосняков зеленомошных – 26 тС/га, сосняков сфагновых – 63 тС/га, осинников – 24 тС/га. На параметры подстилок в условиях средней тайги Республики Коми существенным образом влияет влажность почв. Взаимосвязь между запасами подстилок и их полевой влажностью описывается уравнением: $y=5,3588\ln(x)-20,56$ ($R^2=0,7537$), где x – полевая влажность подстилки (% масс.) в середине вегетационного периода, y – запас подстилки, кг/м².

Ключевые слова: средняя тайга, лесная подстилка, парцелла, тип леса, мощность подстилки, плотность подстилки, масса подстилки, запасы углерода.

Litter features in different forest types in the middle taiga subzone

© 2024. I. A. Likhanova ^{ORCID: 0000-0001-8781-4768}, S. V. Deneva ^{ORCID: 0000-0002-1813-7799},
Yu. V. Kholopov ^{ORCID: 0000-0002-5725-746X}, E. A. Rud ^{ORCID: 0009-0006-3279-701X},
E. A. Skrebenkov ^{ORCID: 0009-0002-4224-9624}, E. M. Lapteva ^{ORCID: 0000-0002-9396-7979}
Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

The article presents the features of forest litters of spruce, pine and aspen forests in the middle taiga subzone of the European north-east of Russia. Litter studies were carried out on the territory of the Lyalsky nature reserve (62°15'N, 50°40' E). The thickness, density, mass, fractional composition and carbon reserves in litter in different forest types were determined. The study showed an increase in humidity and litter reserves during the transition from non-swampy to swampy forest types, as well as high variability in the structure and properties of litter depending on the parcellation of forest biogeocenoses. In blueberry spruce forests the litter reserve in green moss parcels is about 49±17 t/ha, in sphagnum parcels is about 77.0±1.7 t/ha. In green moss pine forests the litter reserve in green moss parcels is 54±17 t/ha, and in microdepressions it reaches 67±15 (long-moss parcels) – 101±19 (sphagnum parcels) t/ha. In blueberry-sphagnum pine forests the litter reserve range from 90±16 to 150±25 t/ha. In aspen blueberry forests the above parameter is about 60±16 t/ha, increasing in long-moss plots to 71±27 t/ha. Carbon reserves in spruce forests are about 18 tC/ha, in green

moss pine forests – 26 tC/ha, in sphagnum pine forests – 63 tC/ha, in aspen forests – 24 tC/ha. The litter parameters in the middle taiga of the Komi Republic are significantly affected by soil moisture. The relationship between litter stocks and their field moisture is described by the equation: $y=5.3588\ln(x)-20.56$ ($R^2=0.7537$), where x is field humidity in the middle of the growing season, %, and y is litter stock, kg/m².

Keywords: middle taiga, forest litter, parcel, forest type, litter thickness, litter density, litter mass, carbon reserve.

Лесная подстилка – важнейший компонент лесного биогеоценоза, представляющий собой слой органического/органико-минерального материала, сформированный преимущественно из растительного опада на поверхности почвы, который является принадлежностью почвы – её органометрическим горизонтом. В зависимости от конкретных условий и времени поступления органического материала находится на разных стадиях разложения, характеризуется постепенной и последовательной гомогенизацией с глубиной и расчленённостью на подгоризонты [1]. При изучении лесных подстилок информативными показателями являются их масса, мощность, плотность сложения и содержание в них органического углерода. Разные структура и состав подстилок в первую очередь связаны с зонально-климатическими условиями, химическими и физическими свойствами почв, строением и продуктивностью фитоценозов, а также с количественными и качественными показателями почвенных биотических сообществ [2–5]. Масса лесной подстилки тесно связана с горизонтальным строением фитоценоза – с его парцеллами [6]. В условиях глобального потепления климата и возрастающего антропогенного воздействия на природные экосистемы актуально изучение депонирования углерода в горизонтах лесных подстилок различных типов почв [7].

Цель исследования – изучение влияния типа леса и парцеллярной структуры живого растительного покрова на строение и свойства горизонтов лесных подстилок в почвах лесных сообществ средней тайги северо-востока европейской части России.

Объекты и методы исследования

Работа выполнена в Республике Коми на территории заказника «Ляльский» (62°15' с. ш., 50°40' в. д.), в границах которого организован тестовый полигон для долговременного мониторинга климатически активных веществ, в том числе парниковых газов. Район исследования характеризуется прохладным, умеренно прохладным климатом со среднегодовой температурой воздуха +0,1 °С. Годовое количество осадков – 693 мм. Со-

гласно почвенно-географическому районированию [8], участок исследований относится к Вымь-Вычегодскому округу типичных подзолистых иллювиально-железистых подзолов, торфянисто-подзолисто-глееватых иллювиально-гумусовых почв подзоны средней тайги. По ботанико-географическому районированию [9] территория приурочена к полосе среднетаёжных лесов Кольско-Печорской подпровинции Северо-европейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойно-лесной) области.

Исследования лесных подстилок проводили в четырёх типах леса: ельниках черничных (4 пробные площади (ПП): 88, 115, 145, 165), сосняках чернично-зеленомошных (2 ПП: 243, 237), сосняках кустарничково-сфагновых (2 ПП: 228, 233) и осинниках черничных (2 ПП: 266, 293). Почвообразующие породы на территории ПП представлены в основном двучленными отложениями. Верхний песчаный слой почв ельников и осинников имеет мощность 20–60 см, подстилается карбонатными суглинками. Сосняки приурочены к отложениям с мощностью песчаной толщи от 70 до 100 см и более. В зависимости от характера почвообразующих пород, условий увлажнения и состава растительности почвенный покров рассматриваемой территории представлен различными подтипами подзолов, подзол-элювозёмов, дерново-элювозёмов (ельники и осинники черничные, сосняки зеленомошные), а также торфяно-подзолов (сосняки кустарничково-сфагновые).

Отбор лесных подстилок проводили в пределах каждой ПП с учётом парцеллярной структуры: в межкрупном пространстве и под кроной деревьев – основных эдификаторов [10]. Для отбора использовали шаблон размером 0,25 × 0,25 м. Подстилки в свежем состоянии разделяли на подгоризонты [11]. Определяли мощность подгоризонтов, их запасы и плотность [12]. Полевую влажность подстилок определяли весовым методом в середине вегетационного периода. Содержание углерода в образцах подстилок измеряли в экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS–O) (CE Instruments, Италия) методом газовой хроматографии. Расчёт

запасов углерода в отдельных подгоризонтах подстилок проводили с учётом их плотности, мощности и содержания в них элемента.

Результаты и обсуждение

Для ельников чернично-зеленомошных и чернично-сфагново-зеленомошных наиболее характерны чернично-зеленомошные парцеллы, где в верхней части почв формируются горизонты лесных подстилок, относящиеся к категории елово-хвоево-чернично-моховых подстилочно-торфяных мало- и среднемощных. Рыхлая слаборазложившаяся часть подстилки (O1) плавно переходит в буровато-коричневатый, войлокообразный уплотнённый слой (O2), переплетённый многочисленными корнями, с обилием мицелия белого и жёлтого цветов. Нижняя часть подстилки (O3) хорошо разложена, имеет тёмно-бурю окраску. Плотность слоёв подстилки с глубиной возрастает от 0,05 до 0,16 г/см³. Мощность подстилок составляет 4–8 см, их запас – 30–64 т/га. К микропонижениям приурочены долгомошно-сфагновые и сфагновые парцеллы. На таких участках лесные подстилки дифференцированы на слой сфагнового очёса (O1), торфяный (T) и перегнойный (H) подгоризонты. Мощность подстилки увеличивается до 10–12 см, её запас – до 73–86 т/га (табл. 1).

Полученные нами данные близки к результатам других исследователей. Например, по данным [2], в среднетаёжных ельниках черничных свежих мощность подстилок порядка 6 см, их запасы 33 т/га, в ельниках черничных влажных – соответственно 9 см и 54 т/га. Согласно [13], в условиях средней тайги Европейско-Уральского региона запас подстилок в еловых насаждениях варьирует в пределах от 17,8 до 60,6 т/га.

Для сосняков чернично-зеленомошных наиболее характерны кустарничково-зеленомошные парцеллы, где органогенный горизонт представлен сосново-хвоево-моховыми подстилочно-торфяными подстилками. Рыхлая светло-бурая, слаборазложившаяся часть (O1) подстилки состоит из отмершей части зелёных мхов с включениями хвои сосны, шишек, веточек. Подгоризонт (O2) – бурый, войлокообразный, переплетён корнями и гифами грибов, присутствует значительное количество древесных остатков последних стадий разложения. Плотность подстилки около 0,09 г/см³, мощность – 6–7 см. Запас подстилок колеблется в пределах 53–57 т/га. В понижениях при увеличении поверхност-

ного гидроморфизма появляются сфагново-зеленомошные, зеленомошно-долгомошные и сфагновые парцеллы. Для сфагново-зеленомошных и зеленомошно-долгомошных парцелл характерны торфянистые подстилки, для сфагновых – торфянисто-перегнойные подстилки, где фиксируется уплотнённый перегнойный горизонт (H). Соответственно, в таких парцеллах мощность подстилок увеличивается до 7–14 см, их запасы – до 65–110 т/га (табл. 1). Для сравнения, запасы подстилок в сосновых насаждениях средней тайги Европейско-Уральского региона составляют в среднем 46,5 т/га с варьированием от 8,6 до 71,9 т/га [13]. В сосняках черничных свежих, формирующихся в условиях средней тайги Республики Коми, мощность лесных подстилок находится на уровне 7 см с запасами органического вещества порядка 40 т/га [2]. Согласно работе [14], в таком же типе леса средняя мощность подстилки составляет порядка 5 (3–9) см и запасы – 56 т/га.

В сосняках кустарничково-сфагновых формируются торфянисто-перегнойные (мощность 9–15 см) и перегнойно-торфянистые (мощность 16–25 см) подстилки. Для них характерна чётко выраженная дифференциация на подгоризонты O–T–H. Подгоризонт O представлен очёсом сфагновых мхов. Торфяный слой T разделяется по окраске торфа и его плотности на несколько подгоризонтов, с глубиной он становится более тёмным и плотным. Перегнойный слой H имеет тёмно-бурю, практически чёрную окраску. По сравнению с остальными слоями он менее мощный. Граница между T и H достаточно резкая. Плотность подстилок с глубиной увеличивается от 0,03 до 0,17 г/см³. Запасы подстилок с учётом парцеллярного строения варьируют от 76 до 150 т/га при их мощности от 9 до 23 см (табл. 1). По данным [15], в среднетаёжных сосняках чернично-сфагновых мощность лесной подстилки составляет 17 см, запас органической массы – 64–75 т/га.

В осинниках лесные подстилки имеют несколько иное строение за счёт их формирования под влиянием преимущественно листового опада. Верхний подгоризонт (AO1/O1) подстилки представлен слоем спрессованных прошлогодних листьев осины с включениями отмерших частей политриховых (редко зелёных) мхов и веточек. Ниже расположен войлокообразный тёмно-бурый, почти чёрный слой ферментации (AO2/O2), переходящий в тёмно-бурый, почти чёрный уплотнённый мелкодисперсный слой (AO3/Oao).

Таблица 1 / Table 1

Средние значения ($X \pm \sigma$) мощности, запасов и плотности лесных подстилок разных типов леса
Average value ($X \pm \sigma$) of litter thickness, stock and density in different forest types

Номер пробной площади Trial area number	Мощность, см / Thickness, cm			Запас, кг/м ² / Stock, kg/m ²			Плотность, г/см ³ / Density, g/cm ³				
	O1	O2/Г	O3/Оао/Н	Общее General	O1	O2/Г	O3/Оао/Н	Общее General	O1	O2/Г	O3/Оао/Н
Ельники зеленомошные / Green moss spruce forests											
88-1	1,2±0,6	3,6±2,3	1,2±0,4	5,4±2,6	0,50±0,10	1,99±0,99	2,33±1,03	4,82±0,6	0,05±0,01	0,06±0,01	0,17±0,05
88-2	1,9±1,3	5,1±3,4	2,1±0,7	9,1±5,2	0,65±0,14	3,35±1,71	3,36±1,33	7,37±2,71	0,05±0,04	0,09±0,01	0,16±0,01
88-3	1,1±0,3	2,9±0,5	-	4,1±0,6	0,73±0,25	2,28±0,45	-	3,00±0,5	0,07±0,01	0,08±0,01	-
115-1	1,0±0,2	2,4±0,4	1,2±0,8	4,6±0,9	0,63±0,18	1,73±0,38	1,87±1,27	4,21±1,4	0,06±0,01	0,08±0,01	0,16±0,03
115-2	0,9±0,1	2,6±0,8	1,0±2,0	4,5±1,7	0,46±0,15	2,5±1,01	1,8±3,68	4,78±2,29	0,05±0,01	0,10±0,03	0,20±0,00
115-3	0,9±0,3	2,3±0,5	2,1±0,7	5,3±0,6	0,53±0,21	1,75±0,30	3,19±0,94	5,47±0,88	0,06±0,01	0,08±0,00	0,18±0,02
145-1	1,5±0,8	2,5±0,7	1,5±1,4	5,5±1,9	0,82±0,61	1,68±0,44	1,95±1,86	4,45±2,01	0,05±0,02	0,07±0,01	0,13±0,01
145-2	1,4±0,5	3,4±0,8	1,6±1,1	6,4±1,7	0,74±0,24	2,36±0,66	2,54±1,70	5,65±1,75	0,06±0,01	0,08±0,02	0,16±0,02
145-3	2,5±1,7	7,5±2,0	2,25±0,5	12,3±3,4	0,59±0,28	3,79±0,87	2,95±0,87	7,33±0,36	0,03±0,01	0,05±0,01	0,16±0,06
163-1	1,6±0,5	4,3±0,9	1,8±1,3	7,6±0,9	0,90±0,19	3,13±0,80	2,35±1,59	6,38±0,96	0,06±0,01	0,07±0,00	0,15±0,02
163-2	1,75±0,5	5,9±1,5	1,9±0,3	9,6±1,0	0,88±0,52	4,6±0,86	3,1±0,76	8,56±1,10	0,05±0,02	0,09±0,01	0,15±0,02
163-3	3,8±2,0	5,3±2,5	1,7±0,3	10,8±4,5	1,87±1,02	2,94±1,09	2,51±0,49	7,33±2,47	0,04±0,01	0,06±0,01	0,18±0,03
Сосняки зеленомошные / Green moss pine forests											
243-1	1,6±0,2	2,9±1,8	1,8±0,3	6,3±2,1	0,96±0,18	2,08±1,41	2,25±0,85	5,29±2,22	0,06±0,01	0,08±0,01	0,13±0,04
243-2	1,1±0,4	4,3±2,0	3,3±1,2	8,8±2,5	0,48±0,22	3,03±0,81	3,0±1,05	6,53±1,04	0,04±0,01	0,08±0,02	0,11±0,02
243-3	3,75±1,1	6,0±0,1	3,8±0,4	13,5±0,7	1,50±0,92	4,50±0,34	4,94±0,80	10,95±0,22	0,04±0,01	0,08±0,01	0,15±0,01
237-1	1,2±0,3	4,0±1,3	1,5±1,3	6,7±1,2	0,75±0,02	3,13±1,11	1,8±1,64	5,68±0,09	0,07±0,01	0,08±0,01	0,13±0,03
237-2	0,8±0,3	3,8±0,3	2,0±1,0	6,6±1,4	0,59±0,25	3,39±0,38	2,89±1,63	6,87±2,09	0,08±0,01	0,09±0,01	0,17±0,01
237-3	1,7±0,3	7,2±0,3	1,8±1,6	10,7±1,0	1,19±0,27	5,94±0,51	2,37±2,05	9,50±2,38	0,07±0,01	0,10±0,00	0,15±0,01
Сосняки сфагновые / Sphagnum pine forests											
233-1	2,3±1,0	10,6±3,8	1,9±0,3	14,8±4,6	1,19±0,80	7,50±3,46	3,19±0,53	11,87±4,54	0,05±0,02	0,08±0,02	0,19±0,04
233-2	2,6±1,2	9,1±3,0	2,6±0,5	14,3±3,8	0,74±0,46	4,75±1,57	3,49±0,50	9,00±1,58	0,03±0,01	0,06±0,03	0,18±0,03
233-3	2,4±1,3	6,25±2,5	3,3±0,6	12,5±0,9	1,52±0,93	4,42±1,75	3,35±0,86	9,29±2,06	0,06±0,01	0,08±0,00	0,11±0,03
228-1	3,5±3,2	17,5±3,7	2,9±1,5	22,7±4,1	1,35±0,98	10,62±3,22	3,05±1,11	15,02±2,46	0,04±0,01	0,07±0,00	0,11±0,03
228-2	1,4±0,4	5,1±2,0	2,5±1,3	9,1±0,8	0,75±0,25	3,98±1,88	2,92±0,68	7,64±1,97	0,05±0,01	0,09±0,02	0,15±0,06
228-3	1,8±0,8	10,8±2,6	1,5±0,5	14,2±2,6	0,65±0,21	7,15±1,21	2,79±0,43	10,60±1,2	0,04±0,01	0,08±0,01	0,15±0,01

Таблица 2 / Table 2

Состав лесной подстилки в разных типах леса / Litter composition in different forest types

Парцелла Parcel	Подгори- зонт Subho- rizon	Ли- стья Lea- ves	Хвоя Need- les	Кустар- нички Dwar- fshrubs	Травы Herbs	Ветви Bran- ches	Шишки Cones	Мхи / Mosses		Кора Bark	Древе- сина Wood	Труха Trash	Пыль/ Пере- гной Dust/ Humus	Минераль- ные частицы Mineral particles
								зелёные green	поли- триховые poly- trichous					
Еловые леса / Spruce forests														
Чернично- зеленомошная Blueberry- green moss	O1	14,1	11,0	1,5	2,4	9,8	4,4	11,0	0	0,4	0	45,5	0	0
	O2	1,1	0,8	0,0	0,3	1,6	0,8	0	0,0	2,1	0	70,7	23,1	0
	O3/Oao	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0,7	0	94,8	3,8
Зеленомошно- долгомошная Green moss - polytrichous	O1	13,0	12,3	2,1	0,4	9,0	1,1	1,0	18,4	0	0	42,6	0	0
	O2	0,7	0,3	0	0	0,6	1,2	0,0	3,1	0	0	94,1	0	0
	O3/H	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0	0	0	85,5	13,9
Сфагновая Sphagnum	O	6,1	10,3	0,2	0,4	2,6	0,2	0,0	2,4	0	0	56,7	0	0
	T	0	0,2	0	0	1,1	0	0	0,7	0,6	2,2	92,4	0	0
	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,0	0	95,4	4,2
Сосновые леса / Pine forests														
Долгомошная Polytrichous	O1	0	1,5	0,0	0	4,5	0	0,0	38,8	0	1,5	48,0	0	0
	O2	0	0	0	0	0	0	0	0,9	3,4	0	95,7	0	0
	O3/H	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	2,1	97,1	0	0
Сфагновая Sphagnum	O	0,7	2,2	3,6	0,3	0,8	8,5	0	0,7	2,0	0	37,1	0	0
	T	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	1,7	0	0,2	0,5	0,9	81,8	0	0
	H	0	0,0	0	0,1	0	0	0	0,1	0,7	0	15,8	81,5	0
Осиновые леса / Aspen forests														
Мёртвопо- крвная Dead-cover	A01	30,2	7,1	0,1	0	2,2	15,9	0,3	1,3	0	0,6	42,3	0	0
	A02	0	0,3	0	0	0	0,9	0	0,3	0	0	98,4	0	0
	A03	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	99,8	0
Долгомошная Polytrichous	O1	17,7	3,3	0,2	0	8,1	0	0,1	24,3	2,7	2,8	40,8	0	0
	O2	0,4	2,9	0	0	1,2	0	0	5,0	0,4	1,2	57,9	29,6	1,4
	Oao	0	2,1	0	0	3,7	0	0	1,0	0,6	1,3	0	82,9	8,4

Таблица 3 / Table 3

Содержание углерода, азота и запасы углерода в подстилке
Carbon, nitrogen and carbon stock content in litter

Номер пробной площади Trial area number	Подгоризонт Subhorizon	Содержание, % Content, %		Запасы углерода, т/га Carbon stocks, t/ha	
		$C_{\text{общ.}} / C_{\text{total}}$	$N_{\text{общ.}} / N_{\text{total}}$	по подгоризонтам in subhorizons	сумма sum
Ельники чернично-зеленомошные / Blueberry-green-moss spruce forests					
88	O1	44,5	1,8	2,7	20,9
	O2	45,3	1,8	15,4	
	H	21,6	0,7	2,8	
115	O1	46,0	1,8	2,3	13,8
	O2	40,2	1,7	8,4	
	O3	18,8	0,9	3,0	
145	O1	43,9	1,8	3,5	17,4
	O2	40,7	1,8	8,5	
	O3	17,9	0,8	5,4	
163	O1	45,1	1,7	4,5	20,6
	O2	44,2	2,3	12,4	
	Oao	13,4	0,9	3,7	
Сосняки кустарничково-зеленомошные / Shrubby green-moss pine forests					
237	O1	49,2	1,4	3,7	25,1
	O2	47,6	1,2	15,0	
	O3	29,4	0,8	6,5	
243	O1	46,4	1,1	5,6	26,5
	O2	46,8	1,2	13,1	
	O3	35,8	0,8	7,9	
Сосняки кустарничково-сфагновые / Shrubby sphagnum pine forests					
233	O	42,6	1,2	5,1	50,6
	T1	42,3	1,0	33,3	
	H	34,0	0,9	12,2	
228	O	46,4	1,0	11,1	76,0
	T1	46,3	0,8	52,1	
	H	45,6	1,0	12,8	
Осинники черничные / Blueberry aspens					
266	AO1	43,4	1,4	3,0	22,8
	AO2	40,5	1,3	19,3	
	AO3	14,1	0,7	2,0	
293	O1	44,9	1,6	2,7	20,9
	O2	45,1	1,5	16,2	
	Oao	27,9	0,9	3,9	

Подстилки мощностью в среднем около 6 см классифицируются в осиновых насаждениях рассмотренной территории как листовенно-осиновые грубогумусовые (AO1–AO2–AO3, что соответствует разделению подстилки на подгоризонты L–F–H), либо как листовенно-осиновые-моховые подстильно-торфяные грубогумусированные (O1–O2–Oao). Их плотность увеличивается с глубиной от 0,06 до 0,16 г/см³, запасы колеблются от 54 до 65 т/га, достигая максимальных значений (71 т/га) в долгомошных парцеллах. Согласно данным

литературы, в подстилках осиновых лесов средней тайги Европейско-Уральского региона накапливается в среднем 27,8 (от 1,9 до 53,8) т/га органической массы [13], в хвойно-лиственных мёртвопокровных лесах мощность подстилок варьирует в пределах 2–4 см, а их запасы – 27–77 т/га [16], что свидетельствует о значительном разбросе параметров лесных подстилок в мелколиственных лесных насаждениях средней тайги.

Анализ фракционного состава подстилок (табл. 2) показал, что их верхняя часть в разных

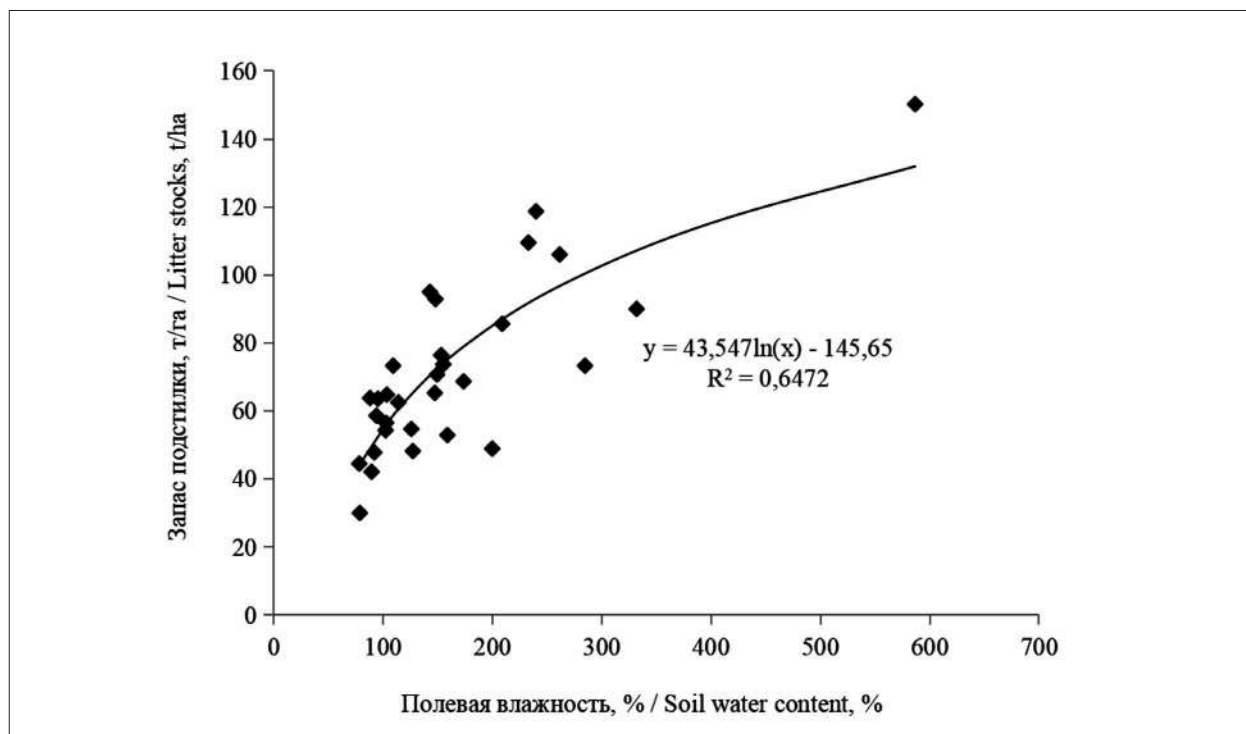


Рис. Взаимосвязь запаса подстилки с её полевой влажностью
Fig. Relationship between litter stocks and soil water content

типах леса представлена остатками мхов, хвои, листьев, веток, а также крупной трухи. В средней части подстилки существенно увеличивается доля трухи, а с глубиной возрастает степень её дисперсности и появляются перегнойные частицы. В зеленомошных, долгомошных, мало-мощных сфагновых подстилках еловых лесов нижняя часть подстилок содержит минеральные частицы за счёт активной жизнедеятельности почвенных беспозвоночных животных.

Содержание углерода и азота в подстилках с глубиной уменьшается, что связано как с минерализацией органического вещества, так и с включением минеральных компонентов в нижнюю часть подстилок за счёт деятельности почвенных беспозвоночных (табл. 3). Максимальное содержание азота отмечено в подстилках ельников. В сосняках, формирующихся на почвах с большой мощностью песчаной толщи, содержание азота в подстилках существенно ниже, особенно в сфагновых сосняках. Это свидетельствует и о тесной связи содержания азота с типом леса и лесорастительными условиями.

Запасы углерода в подстилках почв разных типов леса существенно различаются. В ельниках этот показатель находится на уровне 18 тС/га, осинниках – 24 тС/га, сосняках зеленомошных – 26 тС/га, сосняках сфагновых – 63 тС/га. Полученные нами данные соответствуют данным, приведённым для

лесов средней тайги Европейско-Уральского региона [13]. В таёжных лесах Канады содержание углерода в подстилках ельников кустарничково-зеленомошных составляет 43,5 тС/га, осинников разнотравных – 25,5 тС/га, сосняков лишайниковых – 19,4 тС/га [17]. Для этого же региона запасы углерода в подстилках ельников зеленомошных и сфагновых на глинистых и суглинистых почвах оценены в 61 и 128 тС/га соответственно, а в сосняках лишайниковых на песчаных почвах – 7–10 тС/га [18].

Запасы лесных подстилок в лесных сообществах тесно связаны с условиями увлажнения почв (рис.). По мере увеличения влажности почв и соответственно влажности самих подстилок их запасы увеличиваются. В зеленомошных парцеллах влажность и запасы подстилок ниже, чем в долгомошных и сфагновых. Закономерность увеличения мощности и запасов подстилок в соответствии с увеличением влажности почв отмечена многими авторами [2, 14]. В незаболоченных типах леса запасы подстилок варьируют от 14 до 80 т/га, в заболоченных они достигают 120 т/га [16].

Заключение

Таким образом, впервые для средней тайги Республики Коми (европейский северо-восток

России) выполнены детальные исследования состава, структуры и свойств лесных подстилок в различных типах лесов – ельниках, сосняках и осинниках, развитых на почвах, формирующихся на двучленных почвообразующих породах. Выявлена существенная неоднородность мощности и запасов подстилок в таёжных лесах как в пределах одного типа леса, так и в пределах одной пробной площади. Показано, что параметры подстилок тесно связаны с неоднородностью условий увлажнения почв и уровнем влажности их органических горизонтов – горизонтов и подгоризонтов лесных подстилок. Значительная пространственная неоднородность влажности почв и лесных подстилок в пределах пробных площадей обусловлена, в первую очередь, неоднородностью рельефа местности (микроразнообразия и микроповышения), а также двучленным характером почвообразующих пород и варьированием мощности песчаного слоя, определяющим различия в условиях застоя влаги в поверхностных горизонтах почв. Различия в условиях увлажнения верхних горизонтов почв определяют пестроту горизонтальной структуры растительного покрова и характеристик подстилок. В заболоченных лесах и переувлажнённых парцеллах возрастание массы и запасов подстилок связано не только со слабой минерализацией растительного опада в условиях повышенной влажности почв, но и с изменением состава мохового покрова. Появление и активное развитие сфагновых мхов в микроразнообразиях с поверхностным застоем влаги снижает скорость разложения опада за счёт высокой кислотности и антибактериальных свойств сфагновых мхов.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и темы госзадания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (рег. № 122040600023-8).

Литература

1. Сапожников А.П. Лесная подстилка – номенклатура, классификация и индексация // Почвоведение. 1984. № 1. С. 96–105.
2. Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.
3. Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // For. Ecol. Manage. 2000. V. 133. No. 1–2. P. 13–22. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00294-7
4. Trofymow J.A., Moore T.R., Titus B., Prescott C., Morrison I., Siltanen M., Smith S., Fyles J., Wein R., Camiré C., Duschene L., Kozak L., Kranabetter M., Visser S. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: Influence of litter quality and climate // Can. J. For. Res. 2002. V. 32. No. 5. P. 789–804. doi: 10.1139/x01-117
5. Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G. Litters and living ground cover as informational characteristics of biogeocenoses for the small-leaved forests in Moscow Oblast // Eurasian Soil Science. 2023. V. 56. P. 841–853. doi: 10.1134/S1064229323600513
6. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 312 с.
7. Malmshiemer R.W., Heffernan P., Brink S., Crandall D., Deneke F.F., Galik C., Gee E., Helms J.A., McClure N., Mortimer M., Ruddell S., Smith M., Stewart J. Forest management solutions for mitigating climate change in the United States // J. For. 2008. V. 106. No. 3. P. 115–117. doi: 10.1093/jof/106.3.115
8. Атлас почв Республики Коми / под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с.
9. Растительность Европейской части СССР / под ред. С.А. Грибовой, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1980. 429 с.
10. Карпачевский Л.О., Киселева Н.К. О методике учета опада и подстилки в смешанных лесах // Лесоведение. 1968. № 3. С. 72–79.
11. Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B., Sartori G., Kolb E., Gobat J.-M., Le Bayon R.-C., Aubert M., De Waal R., Van Delft B., Vacca A., Serra G., Chersich S., Andreetta A., Cools N., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K., Brêthes A., De Nicola C., Testi A., Bernier N., Graefe U., Juilleret J., Banas D., Garlato A., Obber S., Galvan P., Zampedri R., Frizzera L., Tomasi M., Menardi R., Fontanella F., Filoso C., Dibona R., Bolzonella C., Pizzeghello D., Carletti P., Langohr R., Cattaneo D., Nardi S., Nicolini G., Viola F. Humusica 1, article 4: Terrestrial humus systems and forms – Specific terms and diagnostic horizons // Appl. Soil Ecol. 2018. V. 122. Part 1. P. 56–74. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.07.005
12. Шумаков В.С., Федорова Е.Л. Методические рекомендации по определению запасов лесной подстилки и её зольности при лесоводственных исследованиях. М.: ВНИИЛХ, 1979. 38 с.
13. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.

14. Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 303 с.

15. Осипов А.Ф., Кузнецов М.А. Содержание органического углерода в болотно-подзолистых почвах хвойных лесов средней тайги // Лесоведение. 2010. № 6. С. 65–70.

16. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 324 с.

17. Yu Z., Apps M.J., Bhatti J.S. Implications of floristic and environmental variation for carbon cycle dynamics in boreal forest ecosystems of central Canada // J. Veg. Sci. 2002. V. 13. No. 3. P. 327–340. doi: 10.1111/j.1654-1103.2002.tb02057.x

18. Preston C.M., Bhatti J.S., Norris C.E. Chemical quality of aboveground litter inputs for jack pine and black spruce stands along the Canadian boreal forest transect case study // *Écoscience*. 2015. V. 21. No. 3–4. P. 202–216. doi: 10.2980/21-(3-4)-3690

References

1. Sapozhnikov A.P. Forest litter – nomenclature, classification and indexation // *Pochvovedenie*. 1984. No. 1. P. 96–105 (in Russian).

2. Bobkova K.S. Biological productivity of coniferous forests of the European Northeast. Leningrad: Nauka, 1987. 156 p. (in Russian).

3. Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // *For. Ecol. Manage.* 2000. V. 133. No. 1–2. P. 13–22. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00294-7

4. Trofymow J.A., Moore T.R., Titus B., Prescott C., Morrison I., Siltanen M., Smith S., Fyles J., Wein R., Camiré C., Duschene L., Kozak L., Kranabetter M., Visser S. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: Influence of litter quality and climate // *Can. J. For. Res.* 2002. V. 32. No. 5. P. 789–804. doi: 10.1139/x01-117

5. Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G. Litters and living ground cover as informational characteristics of biogeocenoses for the small-leaved forests in Moscow Oblast // *Eurasian Soil Science*. 2023. V. 56. P. 841–853. doi: 10.1134/S1064229323600513

6. Karpachevsky L.O. Soil cover diversity in forest biogeocenosis. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1977. 312 p. (in Russian).

7. Malmshemer R.W., Heffernan P., Brink S., Crandall D., Deneke F.F., Galik C., Gee E., Helms J.A., McClure N., Mortimer M., Ruddell S., Smith M., Stewart J. Forest management solutions for mitigating climate change in the

United States // *J. For.* 2008. V. 106. No. 3. P. 115–117. doi: 10.1093/jof/106.3.115

8. Soil atlas of the Komi Republic / Eds. G.V. Dobrovolsky, A.I. Taskaeva, I.V. Zaboeva. Syktyvkar: Komi Republican Publishing House, 2010. 356 p. (in Russian).

9. Vegetation of the European part of the USSR / Eds. S.A. Gribova, T.I. Isachenko, E.M. Lavrenko. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).

10. Karpachevsky L.O., Kiseleva N.K. On the methodology of counting fall and litter in mixed forests // *Lesovedenie*. 1968. No. 3. P. 73–79 (in Russian).

11. Zanella A., Ponge J.-F., Jabiol B., Sartori G., Kolb E., Gobat J.-M., Le Bayon R.-C., Aubert M., De Waal R., Van Delft B., Vacca A., Serra G., Chersich S., Andreetta A., Cools N., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K., Brêthes A., De Nicola C., Testi A., Bernier N., Graefe U., Juilleret J., Banas D., Garlato A., Obber S., Galvan P., Zampedri R., Frizzera L., Tomasi M., Menardi R., Fontanella F., Filoso C., Dibona R., Bolzonella C., Pizzeghello D., Carletti P., Langohr R., Cattaneo D., Nardi S., Nicolini G., Viola F. *Humusica* 1, article 4: Terrestrial humus systems and forms – Specific terms and diagnostic horizons // *Appl. Soil Ecol.* 2018. V. 122. Part 1. P. 56–57. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.07.005

12. Shumakov V.S., Fedorova E.L. Methodological recommendations for determining reserves of forest litter and its ash content during forestry research. Moskva: VNIILKh, 1979. 38 p. (in Russian).

13. Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V. The carbon reserves in litters of forests in Russia // *Lesovedenie*. 2007. No. 6. P. 114–121 (in Russian).

14. Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zyabchenko S.S., Ivanчиков А.А., Морозова R.M. Metabolism of substances and energy in pine forests of the European North. Leningrad: Nauka, 1977. 303 p. (in Russian).

15. Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Organic carbon content in bog-podzolic soils under coniferous forests of the middle taiga // *Lesovedenie*. 2010. No. 6. P. 65–70 (in Russian).

16. Remezov N.P., Pogrebnyak P.S. Forest soil science. Moskva: Lesnaya promyshlennost, 1965. 324 p. (in Russian).

17. Yu Z., Apps M.J., Bhatti J.S. Implications of floristic and environmental variation for carbon cycle dynamics in boreal forest ecosystems of central Canada // *J. Veg. Sci.* 2002. V. 13. No. 3. P. 327–340. doi: 10.1111/j.1654-1103.2002.tb02057.x

18. Preston C.M., Bhatti J.S., Norris C.E. Chemical quality of aboveground litter inputs for jack pine and black spruce stands along the Canadian boreal forest transect case study // *Écoscience*. 2015. V. 21. No. 3–4. P. 202–216. doi: 10.2980/21-(3-4)-3690

Геохимическая характеристика озера Чваниха, памятника природы Кировской области

© 2024. О. А. Липатникова¹, к. г.-м. н., н. с.,

Т. Н. Лубкова¹, к. г.-м. н., с. н. с.,

О. В. Солодянкина², директор музея,

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

²Нолинский музей истории и краеведения,
613440, Россия, г. Нолинск, ул. Ленина, д. 30,

e-mail: lipatnikova_oa@mail.ru

В статье представлена характеристика абиотических (вода и донные отложения) компонентов карстового озера Чваниха, расположенного в Нолинском районе Кировской области и являющегося гидрологическим памятником природы регионального значения. Геохимическая характеристика абиотических компонентов получена с использованием комплекса современных инструментальных методов анализа вещества (ИСП–МС, РФА–ЭД, спектрофотометрия, потенциометрия и др.) и термодинамических расчётов (пакет программы Visual-MINTEQ, версия 3.1). Состав вод косвенно свидетельствует о развитии карбонатного карста (преимущественно растворение доломита) в верхних толщах пород в основании озёрной котловины и наличии незначительных прослоев гипса на глубине. Содержание микрокомпонентов в воде озера не превышает ПДК химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения и в целом соответствует средним содержаниям в реках мира. Преимущественной формой нахождения большинства микроэлементов в растворе являются свободные ионы (для Sr, Ba, Fe, Mn, Zn, Ni, Co, Cd) и карбонатные комплексы (для Cu и Pb). Донные отложения озера представлены тонкодисперсными кварцевыми песками, мощной толщей перекрывающими карстующиеся породы. Низкая степень ожелезнения песков определяет в условиях отсутствия значимой техногенной нагрузки невысокие, типичные для кварцевых песков, содержания потенциальных загрязнителей (Cu, Zn, Pb, Cd, As, Mo, Ni, Cr, V).

Ключевые слова: озеро Чваниха, карстовые провалы, макрокомпонентный состав воды, микроэлементы, термодинамические расчёты, донные отложения.

Geochemical characteristics of the Lake Chvanikha, the natural monument of the Kirov region

© 2024. O. A. Lipatnikova¹ ORCID: 0000-0002-2412-3561^{*}

T. N. Lubkova¹ ORCID: 0000-0003-1953-6334^{*}

O. V. Solodyankina² ORCID: 0000-0003-4887-1000^{*}

¹Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991,

²Nolinsky Museum of History and Local Lore,

30, Lenina St., Nolinsk, Russia, 613440,

e-mail: lipatnikova_oa@mail.ru

The article presents characteristics of the abiotic components (water and bottom sediments) of the karst Lake Chvanikha. The lake is located in the Nolinsky district of the Kirov region and has the status of the hydrological natural monument of regional significance. The results are based on precision analytic data (obtained by ICP-MS, X-ray fluorescence analysis, chemical methods, photometry, etc.) and on thermodynamic calculations (Visual-MINTEQ, ver. 3.1). The composition of the waters indirectly indicates to the development of carbonate karst (mainly the dissolution of dolomite) in the upper rock strata at the base of the lake basin and to the presence of minor gypsum interlayers at depth. The concentrations of dissolved forms of trace elements do not exceed the MPCs of harmful substances in the waters of fishery basins and generally corresponds to the average contents in the rivers of the world. The base forms of trace

elements in water are their free ions (for Sr, Ba, Fe, Mn, Zn, Ni, Co, Cd) and carbonate complexes (for Pb and Cu). The bottom sediments are represented of fine quartz sands, which overlap the karst rocks. In the absence of a significant technogenic impact, the poor grade of sand's ferruginization determines low contents of potential pollutants (Cu, Zn, Pb, Cd, As, Mo, Ni, Cr, V), typical for quartz sands.

Keywords: Lake Chvanikha, karst sinkholes, macrocomponent composition of water, trace elements, thermodynamic calculations, bottom sediments.

В настоящее время на территории Кировской области выделяют более 180 особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [1]. Сохранение интразональной растительности, животного населения и отдельных видов в значительной степени обеспечивают государственный природный заповедник «Нургуш» (Котельничский район) [2], а также памятники природы «Медведский бор» (Нолинский район), «Пилинский лог» (Уржумский район) и другие ООПТ [3, 4].

В 2006 г. Управлением охраны окружающей природной среды и природопользования Кировской области был выпущен целый сборник статей, посвящённых Медведскому бору [5]. Этот памятник природы рассматривается как пример эталонного объекта для изучения дюнно-карстовых ландшафтов [6] и хвойной растительности [7]. В конце 2018 г. в результате сотрудничества администрации г. Нолинска, НКО Фонд «Возрождение» (г. Нолинск), ООО «Нолинская лесопромышленная компания», МБУК «Музей истории и краеведения» г. Нолинска и специалистов Центра компетенций «Использование биологических ресурсов» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» г. Кирова был разработан проект по созданию экологической тропы в Медведском бору – «Жемчужина в ожерелье». Он поддержан грантом Президента РФ на развитие гражданского общества и предоставлен Фондом президентских грантов [8]. Озеро Чваниха, расположенное в 5 км к северо-востоку от п. Медведок, – одна из ключевых остановок на этой тропе и основных достопримечательностей Медведского бора. Это большой водоём, который, в свою очередь, согласно [1], является гидрологическим памятником природы регионального значения и представляет собой цепь из 22 карстовых провалов и 3 карстовых рвов, заполненных водой. У озера причудливая конфигурация берегов. Поэтому интересен его обход, во время которого можно полюбоваться изменяющимися пейзажами, открывающимися с многочисленных мысочков и заливов.

Вопросами происхождения и развития озера активно занимались сотрудники Киров-

ских музеев и институтов в середине прошлого века [4, 9, 10], при этом данные о химическом составе воды озера в литературе отсутствуют.

Целью нашей работы является получение первичных данных о химическом составе абиотических компонентов озера – воды и донных отложений.

Материалы и методы исследований

Озеро Чваниха в Медведском бору представляет собой дугообразную цепочку воронок, заполненных водой, общей длиной более 1 км и глубиной до 14,5 м, ширина озера колеблется от 50 до 120 м. Северо-западнее Чванихи, через лесную дорогу на Нему, находится другое озеро, состоящее из 7 слившихся и весьма быстро развивающихся провалов. Перемычка, по которой проходит дорога, постепенно сужается и в будущем, возможно, совсем исчезнет. Озеро подземно-проточное. Вода в нём холодная, прозрачность достигает 8 м. Это указывает на постоянную подземную циркуляцию воды в озере по системе подземных трещин. В результате здесь не скапливаются органические остатки, дно всегда чистое и песчаное.

Предположительно озеро образовалось на рубеже XIX–XX веков после серии из трёх землетрясений (в 1896, 1897 и 1908 гг.). Косвенно это подтверждается тем, что на карте Нолинского уезда 1887 г. (масштаб 1:84000) [11], составленной Вятским губернским земским статистическим бюро, где обозначены реки, пруды и другие водные объекты, озеро отсутствует.

По схеме районирования [10] на территории Кировской области выделяются три карстовых района: Ивкинский, Немдинско-Вятский (правобережный), Левобережно-Вятский (Медведский). Озеро Чваниха приурочено к последнему из перечисленных. Левобережно-Вятский карстовый район находится в пределах Уржумского поднятия Вятского Увала. Известно, что интенсивность вертикальной трещиноватости неизбежно возрастает в зонах тектонических поднятий (как в сводовых частях, так и на крыльях).

В зонах трещин отседания интенсивно протекают карстовые и суффозионные процессы, приводящие к образованию провальных форм. В карстовой области юга Вятского Увала провальные образования нанизаны на продольные трещины бортового отпора или трещины отседания. Геоморфологически этот район занимает вторую надпойменную террасу р. Вятки, наклонённую к пойме под углом 1–3° [12, 13].

Пробы воды и донных отложений из оз. Чваниха были отобраны летом 2020 г. Для сравнения также был взят образец воды из скважины на территории п. Медведок.

Аналитические работы выполнены на базе аналитических лабораторий геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Содержание главных катионов (Ca, Mg, Na, K) и микроэлементов (Sr, Ba, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Al, Ti, Rb, U, V, Cr, As, Se, Mo, P) в воде анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС, масс-спектрометр ELAN–6100). Калибровку осуществляли по растворам мультиэлементного стандарта (набор ICP-MS-68 A,B, «High-Purity Standards», США). Правильность измерений контролировали использованием внутреннего стандарта (Indium ICP Standard CertiPUR 1002 мг/л±0,4%, «Merck», Германия). Контроль точности проводили измерением стандартного раствора CRM–TMDW (Trace Metals in Drinking Water Standard, «High Purity Standards», США).

Величину химического потребления кислорода (ХПК) определяли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием согласно ГОСТ 31859-2012 (спектрофотометр PortLab 501, Великобритания).

Содержание хлорид- и гидрокарбонат-ионов оценивали методами объёмного титрования; нитрат-иона – методом потенциометрии; сульфат-иона – методом рентгенофлуоресцентного анализа с предконцентрированием по методу высушенной капли согласно [14]. Содержание фосфат-иона рассчитывали по результатам измерения в пробах воды фосфора методом ИСП–МС.

Для графического изображения макро состава воды использованы диаграммы Стиффа [15], построенные с помощью модуля GSS программного пакета The Geochemist's Workbench (GWB) [16].

На основании полученных аналитических данных был проведён термодинамический расчёт растворённых форм нахождения

микрокомпонентов (Ba, Sr, Fe, Mn, Zn, Cd, Ni, Co, Cu, Pb) в водах с применением программы Visual-MINTEQ, версия 3.1 [17]. Исходный состав системы задавали по результатам химических анализов (табл. 1, 2), при этом параметр DOC (Dissolved Organic Carbon), необходимый для расчёта комплексобразования с органическими кислотами в соответствии с Гауссовой моделью растворённого органического вещества (Gaussian DOM), рассчитывали как $DOC=0,375 \cdot XPK$, где $0,375=M(C)/M(O_2)=12/32$. Данный подход традиционно используется, в частности, в работах сотрудников Карельского научного центра [18].

Анализ донных отложений включал определение их минерального и химического состава после предварительного истирания до фракции <0,075 мм.

Минеральный состав донных отложений анализировали с использованием рентгеновского дифрактометра MiniFlex-600 (Rigaku, Япония). Химический состав донных отложений определяли методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (РФА–ЭД) с использованием спектрометра Niton FXL 959 GOLDD+ (Thermo Scientific, США) с продувкой измерительной камеры гелием для повышения пределов обнаружения лёгких элементов (Mg–Cl).

Результаты и обсуждение

Результаты определения макрокомпонентного состава вод из озера и скважины на территории п. Медведок, а также данные по составу подземных вод зоны выщелачивания умеренного климата [19] и средние содержания в реках мира [20] приведены в таблице 1. Исследованные воды ультрапресные (минерализация <0,2 г/л), слабощелочные, по классификации [21] относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе, второму типу. В сравнении со средними содержаниями в реках мира воды озера более минерализованы, содержание Ca, Mg и гидрокарбонат-иона выше, чем в реках мира, а Na, K и хлорид-иона – ниже. Подземные воды на изучаемой территории, напротив, обладают существенно меньшей минерализацией по сравнению с подземными водами зоны выщелачивания умеренного климата в среднем и более высоким значением pH.

При изучении литературных данных о геологическом строении территории авторы столкнулись с несколькими точками зрения

Таблица 1 / Table 1

Минерализация (M), ионный состав и pH вод из оз. Чваниха и скважины на территории п. Медведок / Salinity (S), ionic composition and pH in the waters of the Lake Chvanikha and the well in Medvedok settlement

Объект / Object	pH	M / S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Поверхностные воды / Surface water										
Оз. Чваниха Lake Chvanikha	7,8	185	29,0	10,2	2,3	0,7	133	9,9	0,6	<0,5
PM / WR	–	85,1	11,9	2,98	5,52	1,72	48,6	8,4	5,92	–
Подземные воды / Ground water										
Скважина Well	8,0	140	24,4	5,2	3,6	0,5	89	11,3	1,6	4,4
ПВЗВ / UWLZ	6,8	354	38,3	16,5	23,8	2,74	222	18,2	15,9	2,13

Примечание: ПВЗВ – среднее содержание в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата [19]; PM – среднее содержание в реках мира [20], «–» – информация отсутствует.

Note: UWLZ is the average contents in the underground waters of the moderate climate leaching zone [19]; WR is the average contents in the rivers of the world [20], “–” – no information.

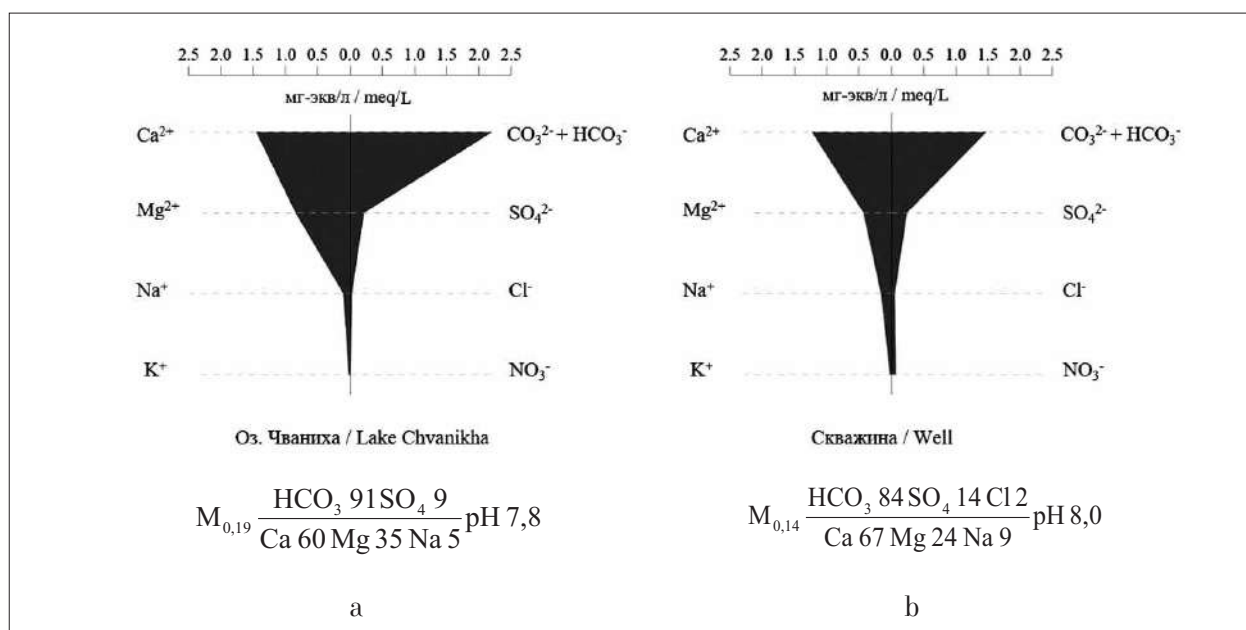


Рис. 1. Диаграммы Стиффа и формулы ионного состава вод из оз. Чваниха (а) и скважины на территории п. Медведок (b)
 Fig. 1. Stiff patterns and ion's formulas for waters of the Lake Chvanikha (a) and the well in Medvedok settlement (b)

о доминирующем типе карстующихся пород: карбонатные (мергели и известняки) [12]; гипсы [13]; верхние толщи представлены доломитами, ниже залегают гипсы, выщелачиванием которых и объясняется образование озёрной котловины [10]. Диаграммы Стиффа (рис. 1) наглядно демонстрируют разницу в составе подземных вод и вод озера и позволяют косвенно судить о том, какие породы подвергаются карстовым процессам.

Состав воды озера соответствует составу вод, характерных для карбонатного карста; заметная доля магния в катионном составе

воды (35 экв. %) свидетельствует о преимущественном растворении доломита. Некоторое увеличение доли сульфатов в подземных водах (до 14 экв. % с 9 экв. % в воде озера) позволяет предположить наличие небольших прослоев гипса на глубине.

Содержание всех изученных микроэлементов в озере (табл. 2) ниже ПДК химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения и в целом соответствует средним содержаниям в реках мира [22].

Содержание микрокомпонентов в воде скважины на территории п. Медведок (табл. 2) ниже ПДК химических веществ в водах

Таблица 2 / Table 2

Содержание растворённых форм микроэлементов (мкг/л) в водах из оз. Чваниха и скважины на территории п. Медведок / The dissolved forms of trace elements content (µg/L) in the water of the Lake Chvanikha and the well in Medvedok settlement

Объект / Object	Sr	Ba	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
Поверхностные воды / Surface water										
Оз. Чваниха Lake Chvanikha	156	37,08	40,0	<0,1	0,09	1,52	0,93	3,22	0,08	0,002
ПДК ₁ / MPC ₁	400	740	100	10	10	10	1	10	6	5
PM / WR	60	23,0	66	34	0,15	0,80	1,48	0,60	0,08	0,08
Подземные воды / Ground water										
Скважина Well	112	13,1	25,8	1	0,06	1,05	0,83	6,91	0,04	0,005
ПДК ₂ / MPC ₂	7000	100	300	100	100	100	1000	5000	30	1
ПВЗВ / UWLZ	185	25,3	689	59	0,34	3,45	4,85	42,80	3,10	0,15
Объект / Object	Al	Ti	V	Cr	As	Se	Mo	U	Rb	Ag
Поверхностные воды / Surface water										
Оз. Чваниха Lake Chvanikha	19	0,59	0,62	0,21	0,75	1,75	0,39	0,28	0,58	0,011
ПДК ₁ / MPC ₁	40	60	1	20	50	2	1	–	100	–
PM / WR	32	0,49	0,71	0,7	0,62	0,07	0,42	0,37	1,63	0,004
Подземные воды / Ground water										
Скважина Well	16	0,35	4,88	1,25	1,76	1,70	0,29	0,64	0,08	0,006
ПДК ₂ / MPC ₂	200	100	100	50	50	10	250	15	100	50
ПВЗВ / UWLZ	165	8,82	1,28	2,83	1,64	0,64	0,89	0,51	2,55	0,24

Примечание: «–» – информация отсутствует; ПДК₁ – предельно-допустимые концентрации химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552); ПДК₂ – предельно-допустимые концентрации химических веществ в водах хозяйственно-питьевого назначения (согласно СанПиН 1.2.3685-21). ПВЗВ – среднее содержание в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата [19], PM – среднее содержание в реках мира [22].

Note: “–” – no information; MPC₁ – maximum permissible concentration for the waters of fishery aquatic formations according to the Order of Ministry of Agriculture of Russia No. 552 of December 13, 2016; MPC₂ – maximum permissible concentration for the waters of domestic and drinking purposes (according to SanPiN 1.2.3685-21); UWLZ is the average contents in the underground waters of the moderate climate leaching zone [19], WR is the average contents in the rivers of the world [22].

хозяйственно-питьевого назначения и в целом находится на уровне средних содержаний в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата [19].

Проведённый термодинамический расчёт показывает, что воды недосыщены по карбонатам кальция и магния (кальциту и доломиту), а также по сульфату кальция (гипсу). Это говорит о потенциальной растворяющей способности вод по отношению к карстующимся породам и возможности дальнейшего развития озера.

Результаты расчёта растворённых форм нахождения микроэлементов, определяющих их токсичность для биоты, представлены на рисунке 2. Основная часть Ba, Sr, Fe, Mn, Cd, Co, Zn и Ni находится в растворе в виде свободных ионов (более 95% Ba, Sr и Fe; более 80% Mn, Cd и Co и более 70% Zn и Ni). На втором месте – карбонатные комплексы (17–22%

Mn, Zn и Ni; 10–15% Cd и Co). Для Ba, Cd, Zn и Ni содержание органических комплексов получено на уровне 2,5–4,5%, для Sr, Fe, Mn и Co – менее 0,01%. Гидроксокомплексы в относительно заметном количестве (около 4,5%) характерны только для Zn, для остальных элементов их количество не превышает 1%.

Распределение по формам нахождения Cu и Pb кардинально отличается от описанных выше элементов. Для них преобладающей формой являются карбонатные комплексы (83 и 76% соответственно); на втором месте – органические комплексы (6% Cu и 16,5% Pb); остальная часть приходится примерно поровну на свободные ионы и гидроксокомплексы. Содержание сульфатных комплексов для всех элементов не превышает 1%; хлоридных и нитратных – 0,01%. Распределение форм нахождения микроэлементов в воде скважины на территории п. Медведок, несмотря на отличия

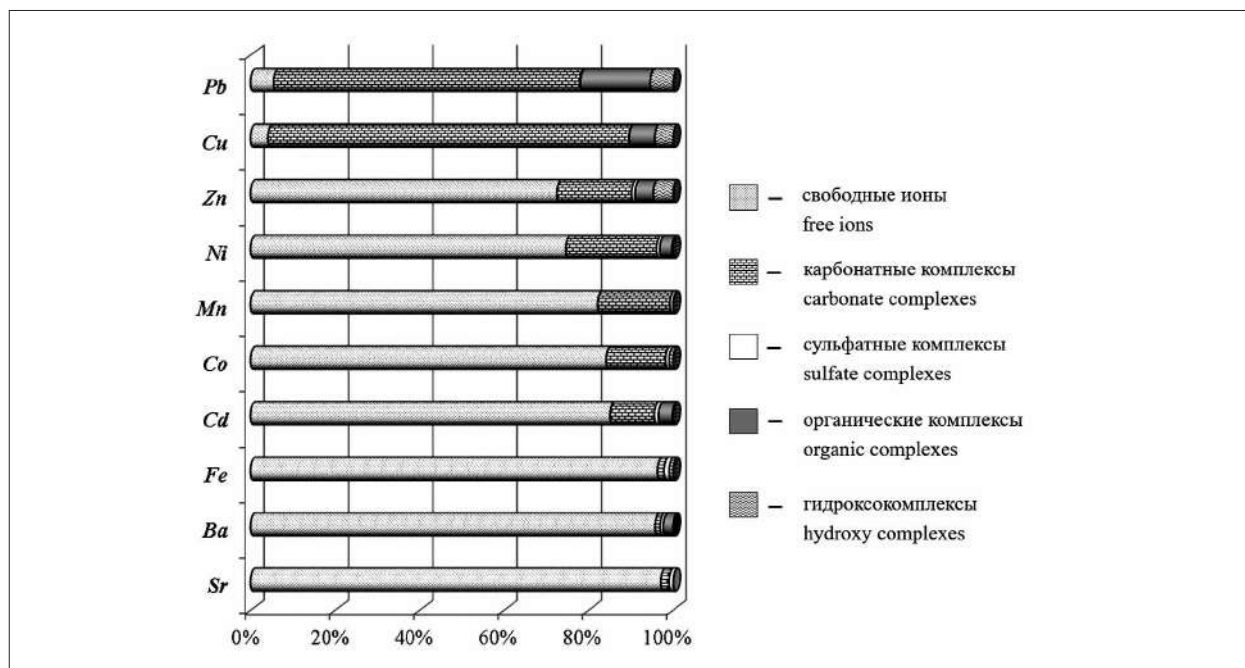


Рис. 2. Результаты термодинамических расчётов распределения растворённых форм нахождения микроэлементов в воде оз. Чваниха
 Fig. 2. The results of thermodynamic calculations of dissolved trace elements speciation in the waters of the Lake Chvanikha

Таблица 3 / Table 3

Химический состав донных отложений оз. Чваниха
 The bottom sediments chemical composition of the Lake Chvanikha

Макрокомпоненты, % / Macrocomponents, %											
Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl
Донные отложения оз. Чваниха / The bottom sediments of the Lake Chvanikha											
-	90,56 ±0,28	6,95 ±0,09	<0,1	0,29 ±0,01	0,68 ±0,02	0,93 ±0,05	<0,01	0,18 ±0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Современные речные пески / Modern river sands											
0,55	86,10	5,45	0,61	0,98	0,96	2,61	0,06	0,74	0,14	0,06	-
Микроэлементы, мг/кг / Trace elements, ppm											
Cu	Zn	Mo	Cd	As	Pb	Ni	Cr	V	Sr	Rb	Zr
Донные отложения оз. Чваниха / The bottom sediments of the Lake Chvanikha											
<10	<5	<2	<2	<2	<5	14±2	50±5	17±3	63±2	12±1	44±1
Стандартный образец кварцевого песка / Standard reference material of quartz sand											
10±1	7,5 ±1,2	4,3 ±0,3	<0,1	<1	1,0 ±0,5	6,3 ±1,6	-	-	-	-	-

Примечание: «-» – информация отсутствует; средние содержания макрокомпонентов для современных речных песков приведены по [23] (информация по микроэлементному составу песков отсутствует); содержания микроэлементов в кварцевом песке приведены согласно паспорту на стандартный образец кварцевого песка OREAS 22c.

Note: “-” – no information; average contents of macrocomponents in the modern river sands are given according to [23] (no information on trace elements); contents of trace elements are given according to certificate of analysis for quartz sand OREAS 22c.

в макрокомпонентном составе, в целом соответствует распределению форм в воде оз. Чваниха.

Донные отложения озера представлены тонкозернистыми песками, которые мощной толщей перекрывают карстующиеся породы. Подобное залегание отложений приводит

к увеличению глубины карстовых провалов по сравнению с районами с поверхностным залеганием карстующихся пород, где воронки не отличаются большой глубиной [10, 13].

По данным рентгеновской дифракции матрица песков преимущественно сложена квар-

цем (90%). В качестве минеральных примесей присутствуют плагиоклаз (5%), смектит (3%), калиевый полевой шпат (2%). Химический состав песков озера Чваниха (табл. 3) в целом соответствует среднему составу современных речных песков, однако характеризуется более высоким содержанием SiO₂ и меньшим содержанием примесей.

Резкое преобладание кварца и слабая степень его ожелезнения определяют низкую сорбционную ёмкость песков озера, что в условиях отсутствия значимой техногенной нагрузки обуславливает невысокие, типичные для кварцевых песков, содержания в донных отложениях потенциальных загрязнителей (Cu, Zn, Pb, Cd, As, Mo, Ni, Cr, V).

Заключение

В результате выполненных исследований охарактеризован состав абиогенных компонентов оз. Чваниха. Установлено, что воды озера, как и подземные воды изученной территории, являются ультрапресными, слабощелочными; по классификации [21] относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе, второму типу.

Состав вод косвенно свидетельствует о развитии карбонатного карста в верхних толщах (преимущественно растворение доломита) и возможном наличии незначительных прослоев гипса на глубине. Низкая минерализация подземных вод и их недосыщенность по кальцию, доломиту и гипсу объясняет высокую растворяющую способность по отношению к карстующимся породам, что, совместно с происходящим понижением уровня грунтовых вод, определяет дальнейшее развитие карстовых процессов и увеличение размеров озера.

Содержание всех изученных микроэлементов в озере ниже ПДК химических веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения и в целом соответствует средним содержаниям в реках мира. Содержание микрокомпонентов в воде источника водопользования на территории п. Медведок ниже ПДК химических веществ в водах хозяйственно-питьевого назначения и в целом соответствует средним содержаниям в подземных водах зоны выщелачивания умеренного климата.

Термодинамический расчёт растворённых форм нахождения микроэлементов в воде показал, что для Sr, Ba, Fe, Mn, Zn, Ni, Co, Cd, преобладающими формами являются свободные ионы, для Cu и Pb – карбонатные комплексы.

Донные отложения озера представлены тонкозернистыми кварцевыми песками, которые мощной толщей перекрывают карстующиеся породы. Резкое преобладание кварца и слабая степень его ожелезнения определяют низкую сорбционную ёмкость песков, что в условиях отсутствия значимой техногенной нагрузки обуславливает невысокие, типичные для кварцевых песков, содержания в донных отложениях потенциальных загрязнителей (Cu, Zn, Pb, Cd, As, Mo, Ni, Cr, V).

Статья подготовлена в рамках проекта «Жемчужина в ожерелье», поддержанного Фондом президентских грантов, и реализуемого в сотрудничестве с администрацией г. Нолинска, МБУК «Музей истории и краеведения» г. Нолинска, НКО «Возрождение» (г. Нолинск), ООО «Нолинская лесопромышленная компания» и центром компетенции «Использование биологических ресурсов» Вятского государственного университета (г. Киров). Авторы выражают благодарность В.Л. Косорукову за помощь в определении минерального состава донных отложений.

Литература

1. Перечень действующих ООПТ на территории Кировской области [Электронный ресурс] <https://geportal43.ru/oopt/list/> (Дата обращения: 12.10.2024).
2. Тарасова Е.М., Кондрухова С.В., Целищева Л.Г. Государственный природный заповедник «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 90–97. doi: 10.25750/1995-4301-2009-2-090-097
3. Савиных Н.П., Пересторонина О.Н., Киселёва Т.М., Шабалкина С.В. Особо охраняемые природные территории Кировской области: современное состояние и перспективы развития // Научные ведомости. Серия Естественные науки. 2011. Т. 9 (104). № 15/1. С. 10–15.
4. Соловьёв А.Н. Памятники природы города Кирова и его окрестностей. Киров: АиСАН, 2017. 136 с.
5. Медведский бор: сборник статей / Упр. охраны окружающей природной среды и природопользования Кировской обл., Координационно-методический совет по экологическому образованию, воспитанию и просвещению населения Кировской обл. Киров: Триада плюс, 2006. 104 с.
6. Матушкин А.С., Прокашев А.М. Структура и картографирование дюнно-карстовых ландшафтов задровых равнин Вятско-Камского Предуралья // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 53–60. doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-053-060
7. Савиных Н.П., Лелекова Е.В., Шаглеина М.Н. О воздействии естественному возобновлению *Pinus sylvestris* L. // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 4. С. 108–113. doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-108-113

References

8. Лелекова Е.В., Коновалова И.А. По экологической тропе среди сосен на дюнах // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий: сб. статей Всероссийской научно-практической конференции. Сочи: изд-во Государственного казенного учреждения Краснодарского края «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», 2019. Т. 6. С. 160–168.

9. Ворончихин Е.И. По Вятскому краю. Ч. 1: Путеводитель по примечательным объектам природы. Киров: Кировский обл. центр детско-юношеского туризма и экскурсий, 1996. 160 с.

10. Ступишин А.В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: изд-во Казанского ун-та, 1967. 291 с.

11. ГИС «Виртуальная Вятская губерния» [Электронный ресурс] <https://gubernia43.ru/> (Дата обращения: 22.06.2021).

12. Энциклопедия Земли Вятской. Т. 7. Природа / под ред. В.А. Ситникова. Киров: Областная писательская организация, 1997. 605 с.

13. Русских А.В., Иванов А.Д. Пещеры и карстовые озёра Волго-Вятского края. Киров, 1992. 87 с.

14. Лубкова Т.Н., Липатникова О.А., Филатова О.Р., Балыкова И.В. Рентгенофлуоресцентный анализ сульфат-иона в водных растворах по методу высушенной капли с использованием портативного спектрометра // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 59–67. doi: 10.33623/0579-9406-2022-2-59-67

15. Stiff H.A. Interpretation of chemical water analysis by means of patterns // Journal of Petroleum Technology. 1951. V. 3. No. 10. P. 15–17. doi: 10.2118/951376-G

16. Программный пакет The Geochemist's Workbench (GWB) [Электронный ресурс] <https://www.gwb.com> (Дата обращения: 03.06.2021).

17. Gustafsson J.P. Программный пакет Visual-MINTEQ. Версия 3.1 [Электронный ресурс] <https://vminteq.lwr.kth.se> (Дата обращения: 21.09.2021).

18. Лозовик П.А., Морозов А.К., Зобков М.Б., Духовичева Т.А., Осипова Л.А. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 2. С. 225–237.

19. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 367 с.

20. Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers // Treatise on Geochemistry. V. 5. Amsterdam: Elsevier-Pergamon, 2004. P. 207–223.

21. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 413 с.

22. Gaillardet Y., Viers Y., Dupre B. Trace elements in river water. Ch. 7.7 // Treatise on Geochemistry. Elsevier Ltd., 2014. V. 7. P. 195–235.

23. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / под ред. А.П. Соловова. М.: Недра, 1990. 335 с.

1. National protected areas of the Kirov region [Internet resource] <https://geoportal43.ru/oopt/list/> (Accessed: 12.10.2021).

2. Tarasova E.M., Kondrakhova S.V., Tselishcheva L.G. The state nature reserve “Nurgush” // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 2. P. 90–97 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-2-090-097

3. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Kiseleva T.M., Shabalkina S.V. Specially conservational natural territories of Kirov region: present status and development prospects // Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences. 2011. V. 9 (104). No. 15/1. P. 10–15 (in Russian).

4. Soloviev A.N. Natural monuments of the Kirov region. Kirov: AiSAN, 2017. 136 p. (in Russian).

5. Medvedsky bor: collection of articles / Department of environmental protection and nature management of the Kirov region. Coordination and methodological council for environmental education, education and enlightenment of the population of the Kirov region. Kirov: Triada plus, 2006. 104 p. (in Russian).

6. Matushkin A.S., Prokashev A.M. Structure and mapping of dune-karst landscapes of sandy plains in Vyatka-Kama Pre-Urals // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 1. P. 53–60 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-053-060

7. Savinykh N.P., Lelekova E.V., Shakleina M.N. About the promotion of natural restoration of *Pinus sylvestris* L. // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 108–113 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-108-113

8. Lelekova E.V., Konovalova I.A. Along the ecological path among the pine trees on the dunes // Sustainable development of specially protected natural areas: collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference. Sochi: State public institution of the Krasnodar region “Natural ornithological park in the Imeretinskaya lowland”, 2019. V. 6. P. 160–168 (in Russian).

9. Voronchikhin E.I. In the Vyatka Region. Part 1: A guide to notable natural sites. Kirov: Kirov region center for youth tourism and excursions, 1996. 160 p. (in Russian).

10. Stupishin A.V. Plain karst and patterns of its development on the example of the Middle Volga region. Kazan: Publishing house of Kazan University, 1967. 291 p. (in Russian).

11. GIS “Virtual Vyatka province” [Internet resource] <https://gubernia43.ru/> (Accessed: 22.06.2021).

12. Encyclopedia of Vyatka Land. V.7. Nature / Ed. V. Sitnikov. Kirov: Regional Writers' Organization, 1997. 605 p. (in Russian).

13. Russkikh A.V., Ivanov A.D. Caves and karst lakes of the Volga-Vyatka region. Kirov, 1992. 87 p. (in Russian).

14. Lubkova T.N., Lipatnikova O.A., Filatova O.R., Balykova I.V. X-ray fluorescence analysis of sulfate-ion in aqueous solutions by dried drop technique using a portable spectrometer // *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2022. No. 2. P. 59–67 (in Russian). doi: 10.33623/0579-9406-2022-2-59-67
15. Stiff H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns // *Journal of Petroleum Technology*. 1951. V. 3. No. 10. P. 15–17. doi: 10.2418/951376-G
16. The Geochemist's Workbench (GWB) [Internet resource] <https://www.gwb.com> (Accessed: 03.06.2021).
17. Gustafsson J.P. Visual-MINTEQ, ver. 3.1 [Internet resource] <https://vminteq.lwr.kth.se> (Accessed: 21.09.2021).
18. Lozovik P.A., Morozov A.K., Zobkov M.B., Dukhovicheva T.A., Osipova L.A. Allochthonous and autochthonous organic matter in surface waters in Karelia // *Water Resources*. 2007. V. 34. No. 2. P. 225–237 (in Russian).
19. Shvartsev S.L. Hydrogeochemistry of hypergenesis zone. Moskva: Nedra, 1998. 367 p. (in Russian).
20. Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers // *Treatise on Geochemistry*. V. 5. Amsterdam: Elsevier-Pergamon, 2004. P. 207–223.
21. Alekin O.A. Foundations of Hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 413 p. (in Russian).
22. Gaillardet Y., Viers Y., Dupre B. Trace elements in river water. Ch. 7.7 // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Ltd., 2014. V. 7. P. 195–235.
23. Handbook of geochemical prospecting for minerals / Ed. A.P. Solovov. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).

Адсорбционное извлечение аминов из водных растворов

© 2024. И. Е. Тарганов¹, аспирант, А. Л. Гакиев¹, аспирант,
 А. А. Кадирбеков², старший преподаватель,
 И. Д. Трошкина¹, д. т. н., профессор,
 Н. А. Бектенов³, д. х. н., профессор, А. Г. Чередниченко⁴, д. х. н., доцент,
¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
 125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,
²Южно-Казахстанский Университет им. М. Ауэзова,
 160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, ул. Тауке Хана, д. 5,
³Казахский национальный педагогический университет им. Абая,
 050010, Республика Казахстан, Алматы, проспект Достык, д. 13,
⁴Российский университет дружбы народов,
 117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
 e-mail: targanov.igor@yandex.ru

В статических условиях изучена возможность очистки водных растворов, содержащих экстрагенты – первичный амин (Primene-JMT) и третичный амин (триоктиламин, ТОА), адсорбцией на углеродных материалах (активированном угле NWC, угле NWC-Т, модифицированном углеродными нанотрубками, угле УС-ПТФЭ, модифицированном политетрафторэтиленом), а также на стиролдвинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и природном адсорбенте – ракушечнике. Методом ограниченного объема раствора изучена кинетика адсорбции аминов Primene-JMT и ТОА из водных растворов этими адсорбентами. Из известных моделей псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и Еловича модель псевдо-второго порядка более адекватно описывает кинетические данные ($R^2 > 0,99$). Определены значения коэффициентов распределения и констант скорости адсорбции аминов Primene-JMT и ТОА. Предложена блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов, реализация которой позволит снизить токсичность сбросных растворов и вернуть в оборот часть дорогостоящего экстрагента.

Ключевые слова: адсорбция, амины, уголь, синтетический полимерный сорбент, модифицированный уголь, ракушечник, коэффициент распределения, константа скорости, блок-схема.

Adsorption recovery of amines from water solutions

© 2024. I. E. Targanov¹ ORCID: 0000-0001-8354-0018, A. L. Gakiev¹ ORCID: 0000-0003-0166-7192,
 A. A. Kadirbekov² ORCID: 0000-0001-9941-9343, I. D. Troshkina¹ ORCID: 0000-0002-5523-0247,
 N. A. Bektenov³ ORCID: 0000-0003-1427-438X, A. G. Cherednichenko⁴ ORCID: 0000-0002-4709-5313,
¹Mendelev University of Chemical Technology of Russia,
 9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,
²South Kazakhstan University named after. M. Auezova,
 5, Tauke Khana St., Shymkent, Republic of Kazakhstan, 160012,
³Abai Kazakh National Pedagogical University,
 13, Dostyk Av., Almaty, Republic of Kazakhstan, 050010,
⁴Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
 6, Miklukho-Maclay St., Moscow, Russia, 117198,
 e-mail: targanov.igor@yandex.ru

Aquatic biological resources are an important part of the ecosystems of our planet, since they are involved in economic turnover as a source of food. The composition of water, including waste water from enterprises, has a direct impact on the state of aquatic biological resources. To extract and concentrate metals from solutions, hydrometallurgical processes are used – extraction and sorption. Their implementation is possible with the use of special substances – extractants and in a number of processes – sorption materials (Solvent Impregnated Resins (SIR's) and Levextrel's) with a mobile phase of the extractant, combining the properties of sorbents and extractants. Despite the advantages of the latter, such as high kinetic parameters, lack of swelling and high values of mechanical strength, they are characterized by the disadvantages of extraction methods – the entrainment of the extractant into the aqueous phase in dissolved and emulsion forms. Under

static conditions, the possibility of purification of aqueous solutions containing primary or tertiary amine by adsorption on carbon materials (activated carbon NWC, carbon NWC-T modified with carbon nanotubes, CS-PTFE modified with polytetrafluoroethylene), as well as on styrene-divinylbenzene nonionic copolymer Porolas-T and a natural shell rock adsorbent was studied. The kinetics of adsorption of amines Primene-JMT and TOA from aqueous solutions by these adsorbents has been studied by the method of a limited volume of solution. Of the known pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich models, the pseudo-second order model describes kinetic data more adequately ($R^2 > 0.99$). The values of the distribution coefficients and the rate constants of adsorption of Primene-JMT and TOA are determined. A block diagram of adsorption purification of aqueous solutions from amines is proposed, the implementation of which will reduce the toxicity of waste solutions and return some of the expensive extractant to circulation.

Keywords: adsorption, amines, coal, synthetic polymer sorbent, modified coal, shell rock, distribution coefficient, velocity constant, block diagram.

Водные биологические ресурсы являются важной частью экосистем нашей планеты, поскольку вовлечены человеком в хозяйственный оборот в качестве источника продовольствия [1]. Состав воды, в том числе сбросных вод предприятий, оказывает непосредственное влияние на состояние водных биоресурсов.

Для удаления органических веществ, включая летучие [2, 3], из растворов могут быть использованы методы, основанные на извлечении и концентрировании (недеструктивные методы) и на полном разложении органических веществ (деструктивные методы).

Недеструктивное извлечение органических веществ из растворов, при котором происходит их концентрирование без разложения, может быть осуществлено осадительными, сорбционными [4–10], мембранными и биологическими [11–13] методами, а также путём выпаривания. При этом происходит образование вторичных отходов: шламов, отработанных адсорбентов, регенерационных растворов, концентратов, которые требуют дальнейшей переработки. В связи с этим, недеструктивные методы используются, как правило, при переработке растворов с невысоким содержанием органических соединений.

Для удаления органических соединений из сточных вод часто используют деструктивные методы, основанные на окислении или разложении органических веществ с образованием газообразных или низкомолекулярных продуктов реакции. К деструктивным методам относят реагентное, гидротермальное, электрохимическое, каталитическое [14–16], биохимическое окисление; разрушение под действием излучений высоких энергий (ультрафиолетовое и гамма-излучение, ускоренные электроны) [17].

Для реагентного окисления используются вещества, обладающие высокой окислительной способностью: перманганат калия, пероксид водорода и озон. К недостаткам одного из наиболее перспективного метода озонирования относятся сложность и дорого-

визна озонаторного оборудования, большие энергозатраты, высокая токсичность озона.

При использовании в гидрометаллургии цветных, редких и радиоактивных элементов экстракционного метода образуются рафинаты, содержащие растворённый экстрагент, например, трибутилфосфат, ди-2-этилгексилфосфорную кислоту, первичные и третичные амины. Среди аминов широко используются первичный амин Primene-JMT и третичный амин TOA [18, 19]. Осуществление сорбционного метода извлечения металлов возможно при применении специальных материалов (импрегнатов и ТВЭКСов) с подвижной фазой экстрагента, сочетающих в себе свойства сорбентов и экстрагентов [20]. Несмотря на высокие кинетические показатели, отсутствие набухаемости и высокие значения механической прочности, им свойственны недостатки экстракционных методов – унос экстрагента в водную фазу в растворённой и эмульсионной формах.

Цель представленной работы – исследование возможности адсорбционного извлечения и определение кинетических характеристик адсорбции аминов Primene-JMT и TOA из водных растворов природным неорганическим, синтетическим полимерным материалами, а также углями, в том числе наномодифицированными.

Объекты и методы исследования

В качестве сорбентов были использованы: – активированный уголь NWC (Chemviron Carbon, UK) со значением удельной поверхности $1250 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$;

– уголь NWC-T (Тамбовский государственный технический университет, РФ) модифицированный углеродными нанотрубками (УНТ) со значением удельной поверхности $1250 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$;

– уголь УС-ПТФЭ (Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, РФ) модифицированный политетрафторэтиленом со значением удельной поверхности $945 \pm 21 \text{ м}^2/\text{г}$;

– синтетический стиролдивинилбензол-ный неионогенный сополимер Поролас-Т (Акционерное общество «ВНИИХТ», РФ) со значением удельной поверхности $800 \pm 100 \text{ м}^2/\text{г}$ [21].

Кроме этого, в работе был использован природный материал – ракушечник, имеющий следующий элементный состав, мас. %: Ca – 33,1; O – 52,1; C – 13,3; Mg – 1,0; Al – 0,14; Si – 0,34.

В качестве аминов применяли экстрагенты: первичный амин Primene-JMT (Dow Inc., USA) и третичный амин – триоктиламин (TOA) (ACROS Organics, USA, содержание 98%). Концентрация экстрагентов в водных растворах составляла $17,3 \text{ ммоль}/\text{дм}^3$.

Для определения ёмкостных характеристик выбранных материалов были проведены эксперименты по адсорбции экстрагентов из водных растворов в статических условиях при соотношении фаз Т:Ж, равном 1:100 ($\text{г}:\text{см}^3$). После контакта фаз в течение 4 ч проводили их разделение и определяли концентрации экстрагентов фотометрическим методом, измеряя оптическую плотность раствора при длине волны 426 нм с использованием фотометра КФК-ЗМ. По разнице концентраций экстрагентов в исходном и равновесном растворах, с учётом соотношения фаз, рассчитывали адсорбционную ёмкость материалов.

Коэффициенты распределения экстрагентов в адсорбенте K_d , $\text{см}^3/\text{г}$ рассчитывали как отношение равновесной ёмкости адсорбента $CE_{\text{равн}}$, ммоль/г к его равновесной концентрации в водном растворе $C_{\text{равн}}$, ммоль/дм³:

$$K_d = \frac{CE_{\text{равн}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 1000 \quad (1)$$

Для математической обработки данных интегральных кинетических кривых адсорбции экстрагентов Primene-JMT и TOA были использованы известные кинетические модели псевдо-первого порядка (2) [22] псевдо-второго порядка (3) [23] и модель Еловича (4) [24, 25].

Математическое описание этих моделей в линейной форме имеет вид:

$$\log(Q_e - Q_\tau) = \log Q_e - \frac{k_1}{2,303} \cdot \tau, \quad (2)$$

$$\frac{\tau}{Q_\tau} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \cdot \tau, \quad (3)$$

$$Q_\tau = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \tau \quad (4)$$

где Q_e , Q_τ – сорбционная ёмкость равновесная и в момент времени τ , ммоль/г; k_1 , k_2 – константы скорости псевдо-первого и псевдо-второго порядка, мин^{-1} , $\text{г}(\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$ соответственно; α – начальная скорость сорбционного процесса, $\text{г}(\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$; β – константа Еловича, $\text{г} \cdot \text{ммоль}^{-1}$.

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили на основании расчёта значения коэффициента детерминации Пирсона R^2 . Коэффициент детерминации R^2 определяет насколько экспериментальные данные близки к выбранной линейной модели. Чем ближе значение R^2 к 1, тем выше степень линейной корреляции между соответствующими массивами данных.

Результаты и обсуждение

Значения адсорбционной ёмкости материалов по аминам Primene-JMT и TOA, а также коэффициенты распределения этих экстрагентов в адсорбентах приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, третичный амин TOA лучше сорбируется выбранными материалами, чем первичный амин Primene-JMT, что может быть связано с его меньшей склонностью к эмульгированию. При этом лучшими ёмкостными характеристиками обладают синтетический неионогенный сополимер Поролас-Т и активированный уголь, модифицированный нанотрубками NWC-Т (табл. 1). При адсорбции первичного амина Primene-JMT коэффициент его распределения составил $1,02 \cdot 10^3$ и $7,9 \cdot 10^2 \text{ см}^3/\text{г}$, третичного амина TOA – $5,78 \cdot 10^3$ и $6,50 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$, соответственно.

Кинетику адсорбции экстрагентов изучали методом ограниченного объёма раствора [26]. Интегральные кинетические кривые сорбции аминов Primene-JMT и TOA приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Линеаризованные кинетические интегральные кривые сорбции аминов Primene-JMT и TOA по модели псевдо-второго порядка представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Константы скорости (k_1 , k_2 и β) адсорбции экстрагентов, рассчитанные с использованием различных кинетических моделей, приведены в таблицах 2 и 3.

Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что кинетические данные по адсорбции экстрагентов Primene-JMT и TOA более адекватно описываются по модели псевдо-второго порядка (табл. 2, 3). Коэффициент детерминации R^2 составляет

Таблица 1 / Table 1

Равновесные характеристики адсорбентов при извлечении аминов Primene-JMT и TOA
Sorption capacitive characteristics of adsorbents for amines Primene-JMT and TO

Адсорбент Adsorbent	Primene-JMT			Триоктиламин / Trioctylamine (TOA)		
	CE, ммоль/г mmol/g	Степень извлечения, % Amine adsorption, %	$K_d \cdot 10^{-3}$, см ³ /г cm ³ /g	CE, ммоль/г mmol/g	Степень извлечения, % Amine adsorption, %	$K_d \cdot 10^{-3}$, см ³ /г cm ³ /g
NWC	1,23	71,0	0,25	1,63	94,4	1,68
NWC-T	1,54	88,8	0,79	1,70	98,5	6,50
УС-ПТФЭ CS-PTFE	1,38	79,7	0,39	1,68	97,3	3,55
Поролас-Т Porolas-T	1,58	91,0	1,02	1,70	98,3	5,78
Ракушечник Shell rock	1,06	61,2	0,16	1,66	95,8	2,27

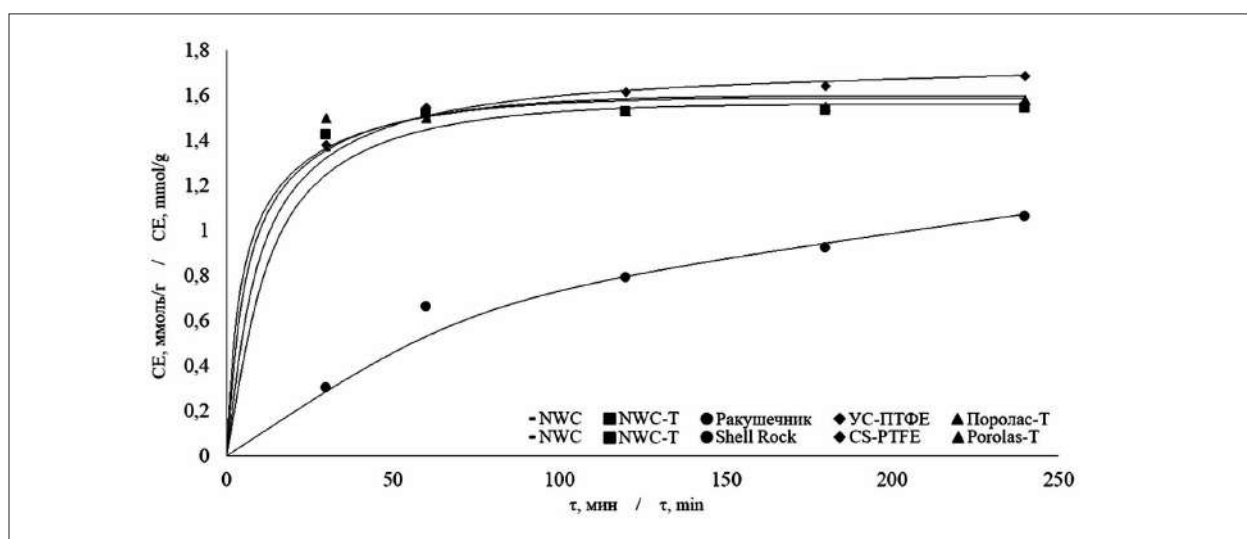


Рис. 1. Интегральные кинетические кривые адсорбции первичного амина Primene-JMT материалами различного типа / Fig. 1. Integral kinetic curves of primary amine Primene-JMT adsorption by materials of various types

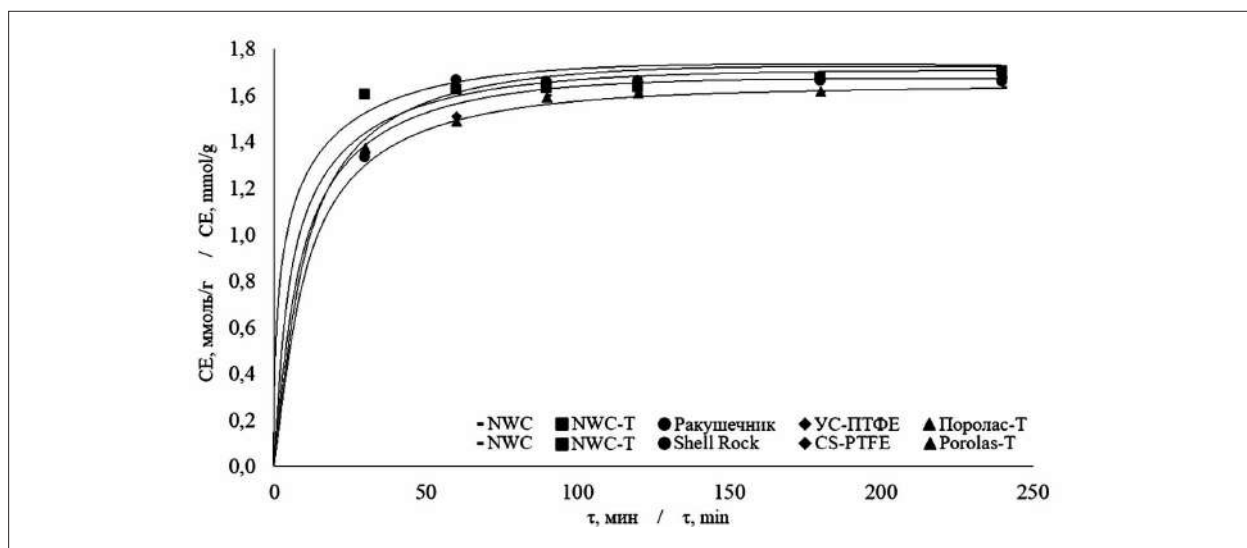


Рис. 2. Интегральные кинетические кривые адсорбции третичного амина TOA материалами различного типа / Fig. 2. Integral kinetic curves of adsorption of tertiary amine TOA by materials of various types

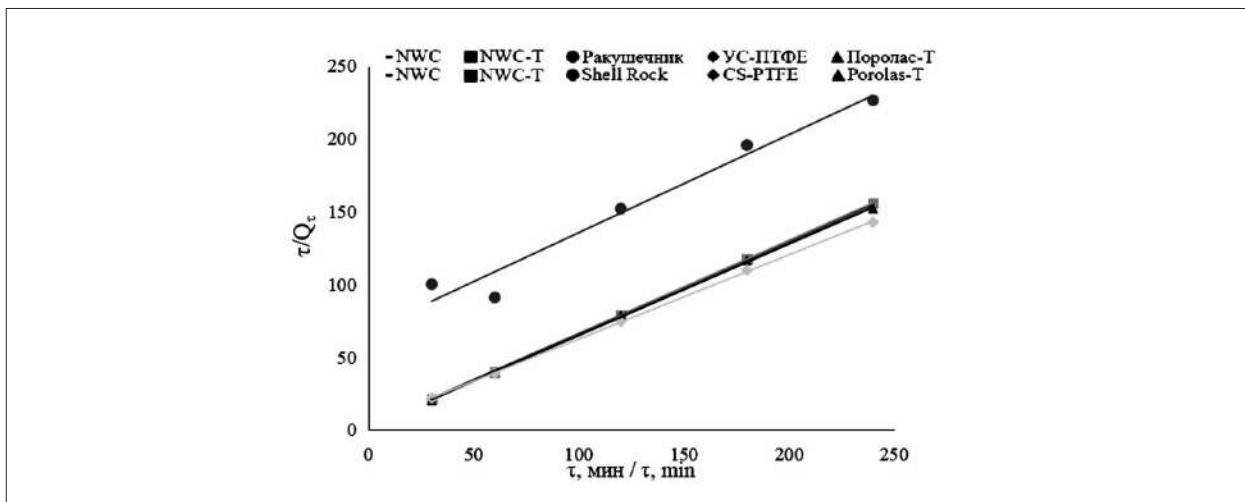


Рис. 3. Линеаризованные кинетические кривые адсорбции первичного амина Primene-JMT из водных растворов по модели псевдо-второго порядка материалами различного типа
Fig. 3. Linearized kinetic curves of primary amine Primene-JMT adsorption from aqueous solutions according to the pseudo-second-order model by materials of various types

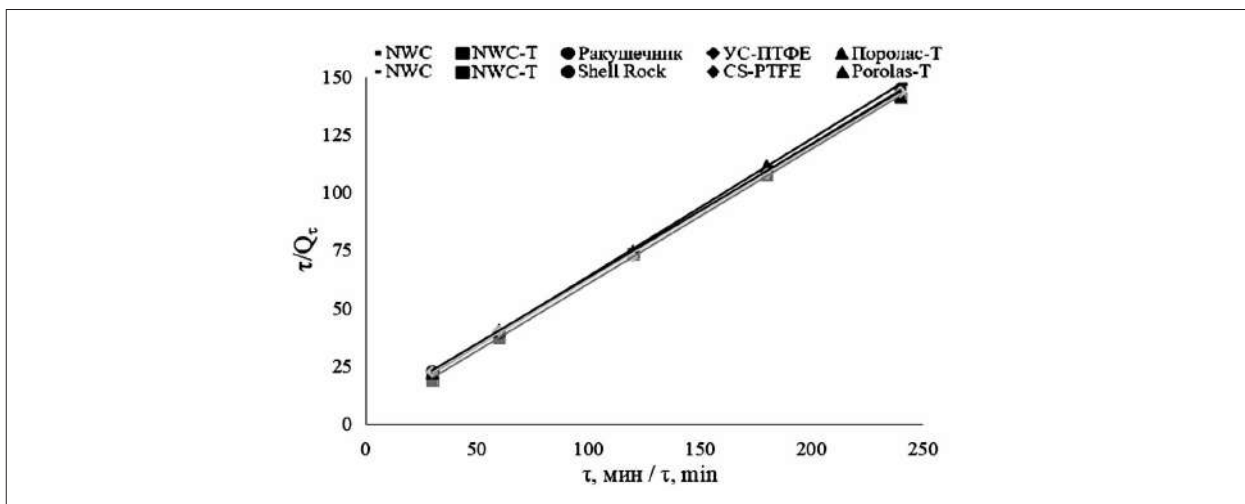


Рис. 4. Линеаризованные кинетические кривые адсорбции третичного амина ТОА из водных растворов по модели псевдо-второго порядка материалами различного типа
Fig. 4. Linearized kinetic curves of adsorption of tertiary amine TOA from aqueous solutions according to the pseudo-second-order model by materials of various types

0,970–0,997. Соответствие экспериментальных данных кинетическому уравнению псевдо-второго порядка указывает на то, что взаимодействие между сорбтивом (сорбатом) и функциональной группой сорбента подчиняется закону действующих масс для реакций второго порядка (скорость взаимодействия пропорциональна произведению концентраций двух реагирующих веществ), компоненты взаимодействуют друг с другом в соотношении 1:1 [27, 28]. Лучшее значение коэффициента детерминации при использовании модели Еловича в случае адсорбции первичного амина Primene-JMT ракушечником может свидетельствовать об энергетической неоднородности поверхности природного адсорбента,

что, в свою очередь, способствует протеканию химической адсорбции [29].

Поскольку на практике часто используют деструктивные методы очистки растворов от экстрагентов, сравнение полученных результатов проводили с данными по очистке от растворённого масла такими адсорбентами, как активированный углеродный волокнистый материал, терморасширенный графит и пенополифенолкарбамид [30]. При адсорбции масла из водных растворов степень извлечения ими составляет 91, 84 и 84% соответственно, что сравнимо с данными, полученными в работе по очистке первичного амина адсорбцией на стиролдивинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и угле

Таблица 2 / Table 2

Константы скорости адсорбции первичного амина Primene-JMT, рассчитанные по кинетическим моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича / Primene-JMT adsorption rate constants calculated from pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich kinetic m

Адсорбент Adsorbent	Модель псевдо-первого порядка The pseudo-first order model		Модель псевдо-второго порядка The pseudo-second order model		Модель Еловича Elovich model	
	$k_1 \cdot 10^2$, 1/мин 1/min	R^2	k_2 , г/(ммоль · мин) g/(mmol · min)	R^2	β , г/ммоль g/mmol	R^2
Ракушечник Shell rock	1	0,967	1,40	0,969	2,95	0,971
NWC	2	0,942	1,02	0,994	11,53	0,851
NWC-T	1,5	0,811	1,01	0,998	19,81	0,789
УС-ПТФЭ CS-PTFE	1,2	0,958	1,03	0,995	7,29	0,948
Поролас-T Porolas-T	0,7	0,977	1,01	0,998	25,77	0,883

Таблица 3 / Table 3

Константы скорости адсорбции третичного амина ТОА, рассчитанные по кинетическим моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича / Tertiary amine TOA adsorption rate constants calculated from pseudo-first order, pseudo-second order and Elovich kinetic models

Адсорбент Adsorbent	Модель псевдо-первого порядка The pseudo- first order model		Модель псевдо-второго порядка The pseudo-second order model		Модель Еловича Elovich model	
	$k_1 \cdot 10^2$, 1/мин 1/min	R^2	k_2 , г/(ммоль · мин) ⁻¹ g/(mmol · min)	R^2	β , г/ммоль g/mmol	R^2
Ракушечник Shell rock	3,1	0,991	1,03	0,993	6,51	0,885
NWC	0,20	0,965	1,03	0,997	7,47	0,932
NWC-T	0,76	0,886	1,01	0,997	22,47	0,869
УС-ПТФЭ CS-PTFE	0,24	0,934	1,03	0,991	6,22	0,932
Поролас-T Porolas-T	0,09	0,888	1,02	0,992	6,76	0,975

NWC-T, модифицированном углеродными нанотрубками (88,8–91,0%) и ниже по очистке этими адсорбентами третичного амина (98,3–98,5%).

Для десорбции экстрагентов с насыщенных адсорбентов использовали раствор карбоната натрия с концентрацией 10 г/дм³. В полученных элюатах наблюдали расслаивание фаз, которое позволяет выделить экстрагент и отправить его в оборот.

Процесс очистки водных растворов от экстрагентов можно осуществлять в соответствии с предлагаемой принципиальной схемой (рис. 5).

Адсорбент и сбросной раствор, включающий оборотный раствор после отстаивания элю-

ата, поступают на стадию сорбции в колонный аппарат. Очищенный раствор направляется в оборот или на технические нужды предприятия. После насыщения адсорбента экстрагентом проводится элюирование щелочным раствором, например, содой, объём которого значительно меньше, чем объём сбросного раствора. Элюат поступает на отстаивание и отделение экстрагента, возвращаемого в цикл экстракции. Раствор после отстаивания, содержащий растворённую органику, поступает снова на стадию адсорбции.

Заключение

В работе изучена возможность очистки водных растворов, содержащих амины (пер-

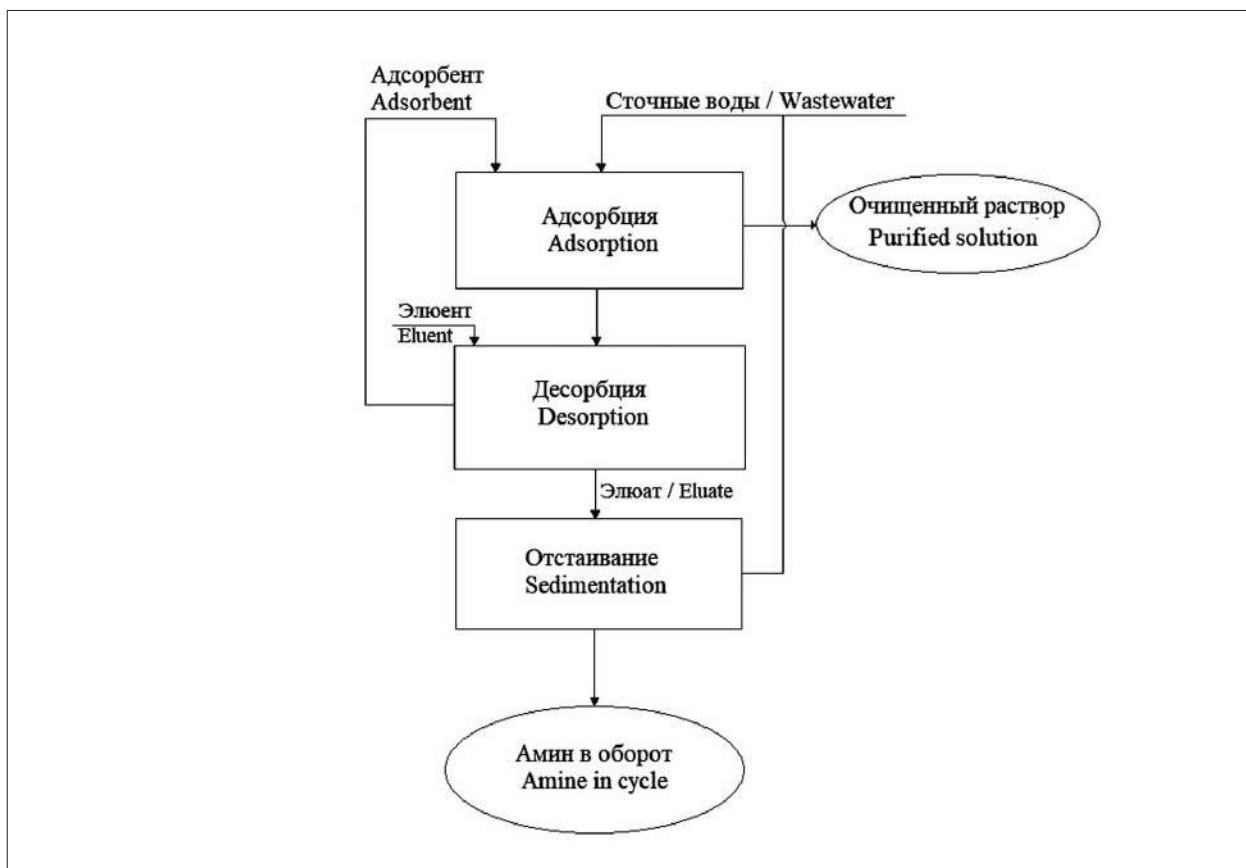


Рис. 5. Принципиальная блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов
 Fig. 5. Schematic block diagram of adsorption purification of aqueous solutions from extractants

вичный амин Primene-JMT и третичный амин ТОА), адсорбцией на углеродных материалах (активированном угле NWC, угле NWC-Т, модифицированном углеродными нанотрубками, угле УС-ПТФЭ, модифицированном политетрафторэтиленом), а также стиролдивинилбензольном неионогенном сополимере Поролас-Т и природном адсорбенте – ракушечнике. В статических условиях определены значения коэффициентов распределения аминов в адсорбентах и установлено, что значительная эмульгируемость третичного амина ТОА по сравнению с первичным амином ответственна за более высокие коэффициенты его распределения. Лучшими ёмкостными характеристиками обладают синтетический неионогенный сополимер Поролас-Т и активированный уголь, модифицированный нанотрубками NWC-Т. Методом ограниченного объёма получены интегральные кинетические кривые адсорбции выбранных аминов из водных растворов этими адсорбентами. Обработка полученных кинетических данных по известным моделям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и модели Еловича позволили рассчитать константы скорости адсорбции аминов и по-

казали, что уравнение модели псевдо-второго порядка более адекватно описывает процесс ($R^2 > 0,99$), что может свидетельствовать о подчинении его закону действующих масс для реакций второго порядка. Лучшее значение коэффициента детерминации при использовании модели Еловича, в случае адсорбции Primene-JMT ракушечником, может быть связано с энергетической неоднородностью поверхности адсорбента.

Сравнение полученных в работе данных с результатами по адсорбции растворённого масла углеродными материалами и пенополифенолкарбамидом показало, что степень извлечения первичного амина на выбранных лучших материалах сравнима со степенью очистки растворов от масла и выше для адсорбции третичного амина.

На основании полученных результатов предложена блок-схема адсорбционной очистки водных растворов от экстрагентов.

Таким образом, полученные в работе данные по очистке растворов, содержащих амины Primene-JMT и ТОА, показывают возможность использования для этой цели всех выбранных адсорбентов.

Осуществление процесса адсорбционной очистки водных растворов, содержащих экстрагент, по предложенной схеме позволит снизить токсичность сбрасываемых растворов, а также вернуть в оборот часть дорогостоящего экстрагента.

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

Литература

1. Торцев А.М. Хозяйственное использование и сохранение водных биологических ресурсов в России: проблемы правового регулирования // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 216–224. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-216-224
2. Kim K.J., Khalekuzzaman M., Suh J.N., Kim H.J., Shagol C., Kim H.J. Phytoremediation of volatile organic compounds by indoor plants: a review // Horticulture, Environment and Biotechnology. 2018. V. 59. P. 143–157. doi: 10.1007/s13580-018-0032-0
3. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // Progress in Chemistry. 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402
4. Auta M., Hameed B.H. Coalesced chitosan activated carbon composite for batch and fix-bed adsorption of cationic and anionic dyes // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. V. 105. P. 199–206. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.12.021
5. Mohmood I., Lopes C.B., Lopes I., Ahmad I., Duarte A.C., Pereira E. Nanoscale materials and their use in water contaminants removal – a review // Environmental Science and Pollution Research. 2013. V. 20. P. 1239–1260. doi: 10.1007/s11356-012-1415-x
6. Kucherova A.E., Shubin I.N., Yermakov A.A., Gerasimova A.V., Memetov N.R., Popova A.A. Kinetic studies on toluene removal from aqueous solutions using carbon nanotubes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 693. Article No. 012039. doi: 10.1088/1757-899X/693/1/012039
7. Aditya D., Rohan P., Suresh G. Nano-adsorbents for wastewater treatment: a review // Research Journal of Chemistry and Environment. 2011. V. 15. P. 1033–1040.
8. Ruan X., Liu H., Chang C.-Y., Fan X.-Y. Preparation of organobentonite by a novel semidry-method and its adsorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution // International Biodeterioration & Biodegradation. 2014. V. 95. P. 212–218. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007
9. Sun Y.B., Chen C.L., Shao D.D., Li J.X., Tan X.L., Zhao G.X., Yang S., Wang X. Enhanced adsorption of ionizable aromatic compounds on humic acid-coated

carbonaceous adsorbents // RSC Advances. 2012. V. 2. P. 10359–10364. doi: 10.1039/C2RA21713A

10. Чаплина Т.О., Пахненко В.П. Особенности очистки поверхностных вод от углеводородов с использованием природных сорбентов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 38–44. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044
11. Cheng Y., He H., Yang C., Zeng G., Li X., Chen H., Yu G. Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds // Biotechnology Advances. 2016. V. 34. P. 1091–1102. doi: 10.1016/j.biotechadv.2016.06.007
12. Гогонин А.В., Щемелина Т.Н., Анчугова Е.М. Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 109–115. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
13. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G.M. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separation Purification Methods. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1081/SPM-100100009
14. Mamaghani A.H., Haghight F., Lee C.-S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: the state-of-the-art // Applied Catalysis B: Environmental. 2017. V. 203. P. 247–269. doi: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037
15. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // Progress in Chemistry. 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402
16. Kuzmin V.I., Kuzmin D.V., Gudkova N.V., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A., Alekseenko V.N., Aksyutin P.V., Bartseva Yu.V., Ivanov A.V., Kryuchek N.M. Autocatalytic decomposition of tributyl phosphate in the spent extractant of the PUREX process for safe disposal of radioactive impurities // Hydrometallurgy. 2022. V. 213. Article No. 105909. doi: 10.1016/j.hydromet.2022.105909
17. Jackson P., Attalla M. Ultra-violet treatment as a strategy for destruction of degradation products from amine-based post combustion CO₂ capture // Energy Procedia. 2013. V. 37. P. 1543–1553.
18. Wen J., Ning P., Cao H., Sun Z., Zhang Y. Controllable recovery of ammonium substituted polyoxovanadate acid compound (ASPOVC) from aqueous/leaching solution by primary amines // Journal of Cleaner Production. 2018. V. 205. P. 728–737. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.237
19. Межов Э.А. Экстракция аминами и четвертичными аммониевыми основаниями. Справочник. М.: Атомиздат. 1977. 304 с.
20. Трошкина И.Д., Обручникова Я.А., Пестов С.М. Сорбция металлов материалами с подвижной фазой экстрагентов // Российский химический журнал. 2017. Т. 61. № 4. С. 54–65. doi: 10.1134/S107036321912048X
21. Ионообменные материалы для процессов гидрометаллургии, очистки сточных вод и водоподготовки: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ВНИИХТ, 1989. 232 с.

22. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances // *Kung Sven Vetén Hand.* 1898. V. 24. P. 39–45.

23. Ho Y.S., McKay G.M. A Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents // *Process Safety and Environmental Protection.* 1998. V. 76. P. 332–340. doi: 10.1205/095758298529696

24. Zeldowitsch J. Uber den mechanismus der katalytischen oxydation von CO an MnO₂ // *URSS, Acta Physicochim.* 1934. V. 1. No. 2. P. 364–449.

25. Chien S.H., Clayton W.R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils // *Soil Science Society of America Journal.* 1980. V. 44. P. 265–268. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x

26. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Ленинград: Химия. Ленинградское отделение, 1970. 336 с.

27. Tran H.N., You S.-J., Hosseini-Bandegharai A., Chao H.-P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review // *Water Research.* 2017. V. 120. P. 88–116. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.014

28. Бабкин А.В., Нескоромная Е.А., Бураков А.Е., Буракова И.В. Кинетика сорбции ионов меди(II) из водных растворов оксидом графена // *Вестник ТГТУ.* 2018. Т. 24. № 1. С. 79–86.

29. Gautam R.K., Chattopadhyaya, M.C. *Nanomaterials for Wastewater Remediation.* Oxford: Elsevier, 2016. 347 p.

30. Богдан Н.Ф., Лоркипанидзе Н.С., Галунова Е.П., Виноградова Л.Е., Асташкина О.В. Адсорбция масла из водных растворов материалами различной природы // *Химические волокна.* 2008. № 4. С. 11–14.

References

1. Tortsev A.M. Problems of legal regulation of commercial use and conservation of fishery resources // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 216–221 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-216-221

2. Kim K.J., Khalekuzzaman M., Suh J.N., Kim H.J., Shagol C., Kim H.J. Phytoremediation of volatile organic compounds by indoor plants: a review // *Horticulture, Environment and Biotechnology.* 2018. V. 59. P. 143–157. doi: 10.1007/s13580-018-0032-0

3. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // *Progress in Chemistry.* 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402

4. Auta M., Hameed B.H. Coalesced chitosan activated carbon composite for batch and fix-bed adsorption of cationic and anionic dyes // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 2013. V. 105. P. 199–206. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.12.021

5. Mohmood I., Lopes C.B., Lopes I., Ahmad I., Duarte A.C., Pereira E. Nanoscale materials and their use in water contaminants removal – a review // *Environmental Science and Pollution Research.* 2013. V. 20. P. 1239–1260. doi: 10.1007/s11356-012-1415-x

6. Kucherova A.E., Shubin I.N., Yermakov A.A., Gerasimova A.V., Memetov N.R., Popova A.A. Kinetic studies on toluene removal from aqueous solutions using carbon nanotubes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019. V. 693. Article No. 012039. doi: 10.1088/1757-899X/693/1/012039

7. Aditya D., Rohan P., Suresh G. Nano-adsorbents for wastewater treatment: a review // *Research Journal of Chemistry and Environment.* 2011. V. 15. No. 2. P. 1033–1040.

8. Ruan X., Liu H., Chang C.-Y., Fan X.-Y. Preparation of organobentonite by a novel semidry-method and its adsorption of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2014. V. 95. P. 212–218. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007

9. Sun Y.B., Chen C.L., Shao D.D., Li J.X., Tan X.L., Zhao G.X., Yang S., Wang X. Enhanced adsorption of ionizable aromatic compounds on humic acid-coated carbonaceous adsorbents // *RSC Advances.* 2012. V. 2. P. 10359–10364. doi: 10.1039/C2RA21713A

10. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of purification of surface waters from hydrocarbons using natural sorbents // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 4. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044

11. Cheng Y., He H., Yang C., Zeng G., Li X., Chen H., Yu G. Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds // *Biotechnology Advances.* 2016. V. 34. P. 1091–1102. doi: 10.1016/j.biotechadv.2016.06.007

12. Gogonin A.V., Schemelina T.N., Anchugova E.M. Evaluation of the use of waste water as a nutrient medium for the accumulation of microalgae biomass // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 109–115 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115

13. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G.M. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separation Purification Methods.* 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1081/SPM-100100009

14. Mamaghani A.H., Haghghat F., Lee C.-S. Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: the state-of-the-art // *Applied Catalysis B: Environmental.* 2017. V. 203. P. 247–269. doi: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037

15. Zhao Q., Ge Y., Ji N., Song C., Ma D., Liu Q. Removal of volatile organic compounds by catalytic oxidation technology // *Progress in Chemistry.* 2016. V. 18. P. 1847–1859. doi: 10.7536/PC160402

16. Kuzmin V.I., Kuzmin D.V., Gudkova N.V., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A., Alekseenko V.N., Aksyutin P.V., Bartseva Yu.V., Ivanov A.V., Kryuchek N.M. Autocatalytic

decomposition of tributyl phosphate in the spent extractant of the PUREX process for safe disposal of radioactive impurities // *Hydrometallurgy*. 2022. V. 213. Article No. 105909. doi: 10.1016/j.hydromet.2022.105909

17. Jackson P., Attalla M. Ultra-violet treatment as a strategy for destruction of degradation products from amine-based post combustion CO₂ capture // *Energy Procedia*. 2013. V. 37. P. 1543–1553.

18. Wen J., Ning P., Cao H., Sun Z., Zhang Y. Controllable recovery of ammonium substituted polyoxovanadate acid compound (ASPOVC) from aqueous/leaching solution by primary amines // *Journal of Cleaner Production*. 2018. V. 205. P. 728–737. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.237

19. Mezhev E.A. Extraction with amines and quaternary ammonium bases. Directory. Moskva: Atomizdat, 1977. 304 p. (in Russian).

20. Troshkina I.D., Obruchnikova Y.A., Pestov S.M. Metal sorption by materials with a mobile phase of extractants // *Russ. J. Gen. Chem.* 2019. V. 89. No. 12. P. 2721–2732. doi: 10.1134/S107036321912048X

21. Ion-exchange materials for hydrometallurgical processes, wastewater treatment and water treatment: A Handbook. 4th ed., revised. and additional Moskva: VNIKhT, 1989. 232 p. (in Russian).

22. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances // *Kung Sven Vetén Hand.* 1898. V. 24. No. 1. P. 39–45.

23. Ho Y.S., McKay G.M. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various

sorbents // *Process Safety and Environmental Protection*. 1998. V. 76. P. 332–340. doi: 10.1205/095758298529696

24. Zeldowitsch J. Uber den mechanismus der katalytischen oxydation von CO an MnO₂ // *URSS, Acta Physicochim.* 1934. V. 1. No. 2. P. 364–449.

25. Chien S.H., Clayton W.R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. V. 44. P. 265–268. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x

26. Kokotov Yu.A., Pasechnik V.A. Equilibrium and kinetics of ion exchange. Leningrad: Khimia. Leningradskoe otdelenie, 1970. 336 p. (in Russian).

27. Tran H.N., You S.J., Hosseini-Bandegharai A., Chao H.P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review // *Water Research*. 2017. V. 120. P. 88–116. doi: 10.1016/j.watres.2017.04.014

28. Babkin A.V., Neskornomnaya E.A., Burakov A.E., Burakova I.V. Kinetics of sorption of copper(II) ions from aqueous solutions by graphene oxide // *Vestnik TSTU*. 2018. V. 24. No. 1. P. 79–86. doi: 10.17277/vestnik.2018.01.pp.079-086

29. Gautam R.K., Chattopadhyaya M.C. Nanomaterials for wastewater remediation. Oxford: Elsevier, 2016. 347 p.

30. Bogdan N.F., Lortkipanidze N.S., Galunova E.P., Vinogradova L.E., Astashkina O.V. Adsorption of oils from aqueous solutions by materials of various natures // *Chemical fibers*. 2008. No. 4. P. 11–14 (in Russian).

Исследование адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарности

© 2024. Ф. В. Юсубов¹, д. т. н., профессор,

И. А. Алиев¹, к. т. н., доцент,

С. Н. Гулиева², к. т. н., доцент,

¹Азербайджанский технический университет,

AZ1073, Азербайджан, г. Баку, проспект Г. Джавида, д. 25,

²Азербайджанский государственный университет

нефти и промышленности,

AZ1010, Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, д. 20,

e-mail: yusfax@mail.ru

Исследовано влияние начальной концентрации, скорости и температуры адсорбтива на адсорбционное разделение газовых смесей (CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S). В качестве модельной использовалась смесь газов с объёмной концентрацией компонентов: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% и CH_4 – 85%. В качестве адсорбента использовали гранулы клиноптилолита неправильной формы. Получены изотермы адсорбции CO_2 при разных температурах (293, 313 и 323 К), которые свидетельствовали о том, что с увеличением температуры адсорбируемость CO_2 уменьшается. Вид изотерм соответствует Лэнгмюровским. Экспериментально изучены выходные кривые адсорбции газовых смесей в зависимости от скорости потока газа и различных начальных концентраций CO_2 . Исследованы выходные кривые адсорбции компонента CO_2 при различных скоростях потока газа: 20, 50, 80 мл/мин. С уменьшением скорости потока газа равновесное время увеличивается. Получены выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO_2 (5, 10 и 20%). Определено, что с уменьшением начальных концентраций CO_2 , время равновесия тоже увеличивается. Установлено, что компоненты газовых смесей сорбируются в сторону уменьшения: $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 \rightarrow \text{N}_2$. Полученная система уравнений модели, описывающая адсорбционное разделение газовых смесей в неподвижном слое адсорбента, представляет полную математическую модель рассматриваемого процесса в нестационарных условиях. Полученные закономерности процесса адсорбции газовых смесей свидетельствуют о том, что процесс происходит в условиях нестационарности. Предложенные модели оптимального проектирования промышленных адсорберов можно использовать для адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

Ключевые слова: адсорбция, газовая смесь, нестационарность, математическая модель.

Study of adsorption separation of gas mixtures under non-stationary conditions

© 2024. F. V. Yusubov¹ ORCID: 0000-0002-3496-8947^{*}

I. A. Aliyev¹ ORCID: 0000-0002-2716-9696^{*}

S. N. Guliyeva² ORCID: 0000-0001-5631-6563^{*}

¹Azerbaijan Technical University,

25, G. Javid avenue, Baku, Azerbaijan, AZ1073,

²Azerbaijan State University of oil and industry,

20, Azadliq avenue Baku, Azerbaijan, AZ1010,

e-mail: yusfax@mail.ru

The influence of the initial concentration, rate and temperature of adsorption on the adsorption separation of gas mixtures (CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S) is investigated. Components: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% and CH_4 – 85%. And as an adsorbent granule of clinoptilolite of irregular shape were used. Isothermal adsorption of CO_2 was obtained at different temperatures (293, 313, and 323 K). The obtained isotherms of CO_2 adsorption showed that with an increase in temperature, the adsorption of CO_2 decreased. The type of isotherms corresponds to Langmuir. The output curves of gas mixture adsorption depending on the gas flow rate and various main components of CO_2 were also experimentally studied. The output curves of the adsorption of the CO_2 component were studied at various gas flow rates of 20, 50, and 80 mL/min. Equilibrium time increases with a decrease in the gas flow rate. Output curves were also obtained depending on the initial CO_2 concentrations of 5%, 10% and 20%. It was determined that with a decrease in the initial concentration of CO_2 , the equilibrium time also increases. Gas mixture components sorbed downwards: $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 \rightarrow \text{N}_2$. The resulting system

of model equations describing the adsorption separation of gas mixtures in a fixed adsorbent layer represents a complete mathematical model of the process under unsteady conditions. The obtained regularities of the process of adsorption of gas mixtures testify to the fact that the process takes place under non-stationary conditions. The proposed models for the optimal design of industrial absorbers can be used for adsorption separation of gas mixtures in the conditions of their unsteady flow.

Keywords: adsorption, gas mixture, non-stationary, mathematical model.

Защита окружающей среды от загрязнений вредными выбросами промышленности является глобальной проблемой. Известно, что адсорбционные процессы становятся доступными для многих химико-технологических процессов выделения целевых компонентов из смесей, очистки сточных вод и отходящих газов от токсичных веществ, осушки газов и т. д. [1, 2].

В связи с этим особую актуальность приобретает изучение адсорбционных процессов в неподвижном слое адсорбента. Однако остаётся нерешённым целый ряд проблем. В частности, недостаточно исследован процесс газофазной адсорбции с переменными начальными концентрациями, скоростями потока и температурами в неподвижном слое адсорбента [3–5].

Как известно, одним из основных факторов, влияющих на адсорбционное разделение, является природа сырья. Надо отметить, что в промышленных условиях часто используется сырьё из различных месторождений, вследствие чего в нём меняется концентрация, скорость потока и температура адсорбируемых веществ [6].

Цель исследования – математическое моделирование процесса газофазной адсорбции с переменными начальными концентрациями,

скоростями потока и температурами в неподвижном слое адсорбента.

Объекты и методы исследования

Схема экспериментальной установки адсорбции газовых смесей показана на рисунке 1. В качестве модельной газовой смеси использована смесь газов с объёмной концентрацией компонентов: N_2 – 5%, H_2S – 5%, CO_2 – 5% и CH_4 – 85%. Перепад давления в адсорбционном слое поддерживается на уровне 20 кПа.

В качестве адсорбента использовали гранулы клиноптилолита неправильной формы светло-серого или жёлто-серого цвета, с размером пор не более 7,2 нм. Отношение Si/Al для клиноптилолита равно 4,2–5,3.

Характеристика природного клиноптилолита (месторождение Ай-Даг) приведена в таблице.

Газовые смеси в разных соотношениях компонентов CH_4 , H_2S , CO_2 и N_2 пропускали через неподвижный слой клиноптилолита при давлении 0,0–0,35 МПа и температуре 293, 313, 323 К.

В неподвижном слое клиноптилолита происходит адсорбция CH_4 , H_2S , CO_2 и N_2 . На

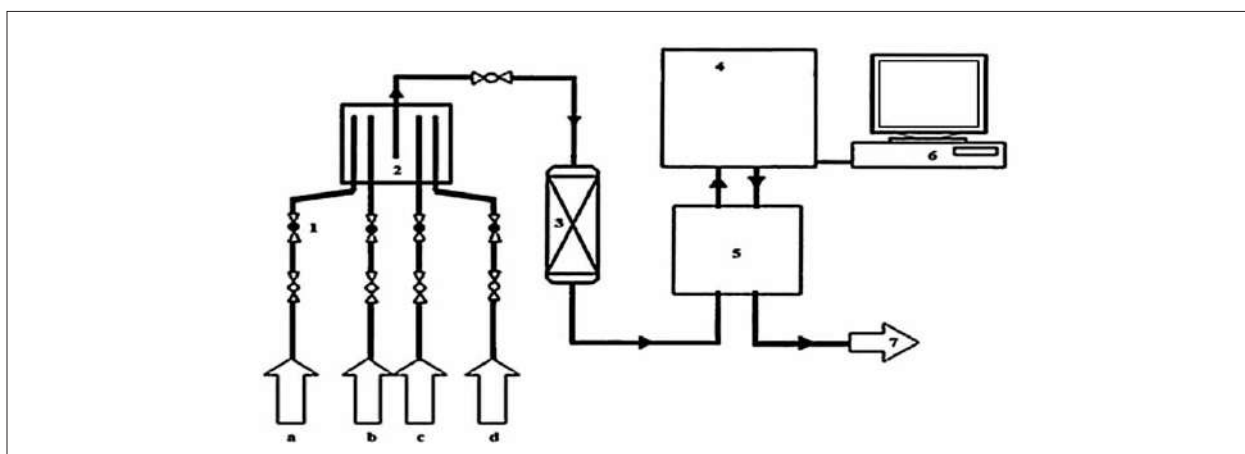


Рис. 1. Схема экспериментальной установки адсорбции газовых смесей: 1 – игольчатый вентиль; 2 – смеситель газов; 3 – адсорбер с неподвижным слоем; 4 – хроматограф (Rubotherm Series IsoSORP SA); 5 – шестигранный клапан; 6 – компьютер; 7 – выход газов (a – H_2S ; b – CO_2 ; c – CH_4 ; d – N_2)

Fig. 1. Scheme of the experimental installation of adsorption of gas mixtures: 1 – needle valve; 2 – gas mixer; 3 – adsorber with a fixed bed; 4 – chromatograph (Rubotherm Series IsoSORP SA); 5 – six-sided valve; 6 – computer; 7 – gas outlet (a – H_2S ; b – CO_2 ; c – H_2S ; d – N_2)

Таблица / Table

Характеристика природного клиноптилолита / Characterization of natural clinoptilolite

Показатель / Indicator	Клиноптилолит / Clinoptilolite
Насыпная плотность, г/см ³ / Bulk density, g/cm ³	0,65–0,7
Содержание клиноптилолита: более % Clinoptilolite content: more than %	76–80
Пористость, % / Porosity, %	29,4–50
Межзерновая пористость: не менее % Intergranular porosity: not less than %	40
Водостойкость: не менее % / Water resistance: not less than %	95
Виброизнос: не более % / Vibration wear: no more than %	1
Термоустойчивость, °С / Thermal stability, °С	650
Механическая прочность гранул на раздавливание: не менее кг на гранулу / Mechanical crushing strength of granules: not less than kg per granule	8
Обменная ёмкость по NH ₄ ⁺ : не менее мг-экв/г Exchange capacity for NH ₄ ⁺ : not less than mg-eq/g	0,70–2,5
Стандартные фракции: (выход целевой фракции не менее 85%) мм Standard fractions: (target fraction yield not less than 85%) mm	3–5
Влагоёмкость в статических условиях при относительной влажности воздуха 1,0%: не менее мг/см ³ Moisture capacity under static conditions at relative humidity 1.0%: not less than mg/cm ³	60
Внешний вид / Appearance	гранулы неправильной формы irregular granules
Цвет / Color	светло-серый, жёлто-серый light gray, yellow gray
Размеры полостей, Е / Cavity sizes, E	4,0–7,2

скорость газовой смеси оказывают влияние гидравлическое сопротивление слоя адсорбента, а также другие факторы, связанные с массообменом между газовым потоком и цеолитом. Слой цеолита постепенно насыщается компонентами газовой смеси.

После полного насыщения цеолита адсорбер переключают на режим десорбции. Корреляционная связь между переменными X и Y устанавливается на основе статистических методов анализа. Используются уровни значимости P=0,05.

Коэффициент детерминации полученных кривых составляет R²=0,94–0,99. Коэффициент детерминации для модели с константой принимает значения от 0 до 1. Чем ближе значение коэффициента к 1, тем сильнее зависимость.

При оценке регрессионных моделей это интерпретируется как соответствие модели данным.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов после обработки данных в виде изотерм адсорбции изобра-

жены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, изотермы адсорбции H₂S, CO₂, CH₄, и N₂ имеют нелинейный характер и отличаются лишь величинами адсорбции.

Эксперименты проводили до получения равновесных величин адсорбции H₂S, CO₂, CH₄, и N₂ природными клиноптилолитами.

Также получены изотермы адсорбции CO₂ при разных температурах: 293, 313 и 323 К (рис. 3).

Полученные изотермы адсорбции CO₂ свидетельствуют о том, что с увеличением температуры величины адсорбируемости уменьшаются (рис. 3). Изотермы адсорбции соответствуют типу изотермы Ленгмюра. Изотермы адсорбции разных компонентов газовых смесей (H₂S, CO₂, CH₄, и N₂) получены при температуре 313 К [7–13]:

$$C = C_m \cdot b \cdot P / (1 + b \cdot P).$$

Экспериментально также изучены выходные кривые адсорбции в зависимости от скорости потока газа при различных концентрациях компонента CO₂. На рисунке 4 показаны выходные кривые адсорбции компонента

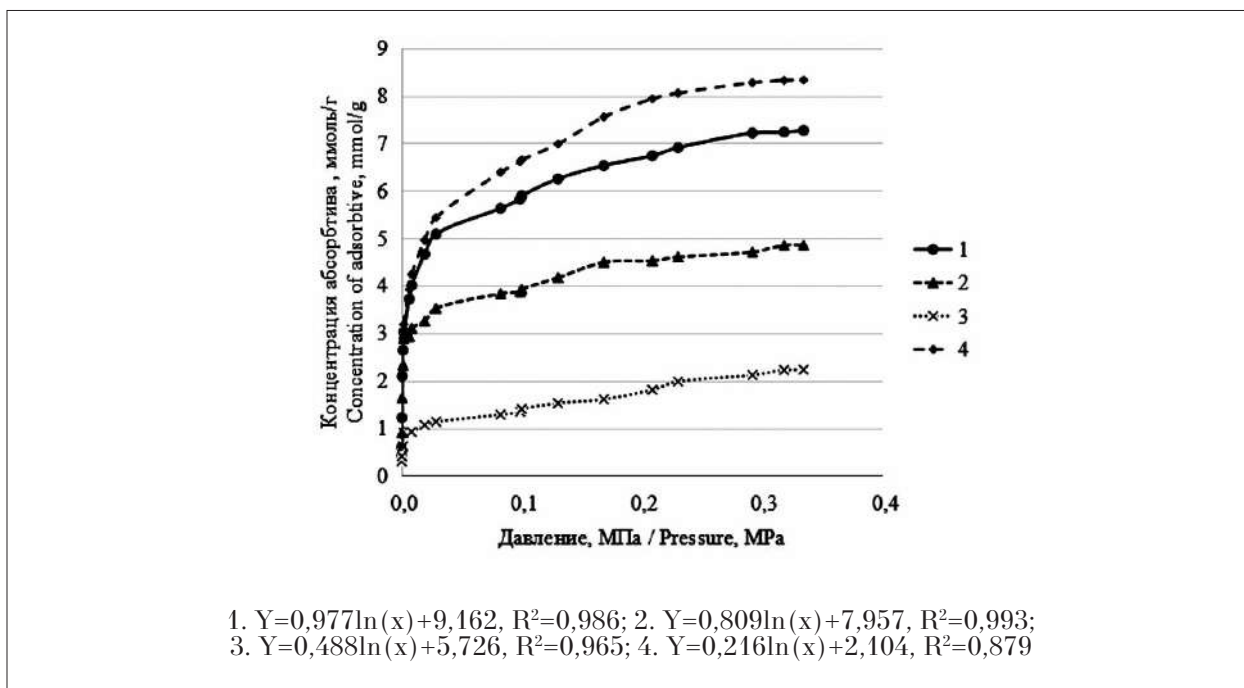


Рис. 2 Изотермы адсорбции для компонентов газовых смесей при 313 К: 1 – H₂S; 2 – CO₂; 3 – CH₄; 4 – N₂
 Fig. 2 Adsorption isotherms for components of gas mixtures at 313 K: 1 – H₂S; 2 – CO₂; 3 – CH₄; 4 – N₂

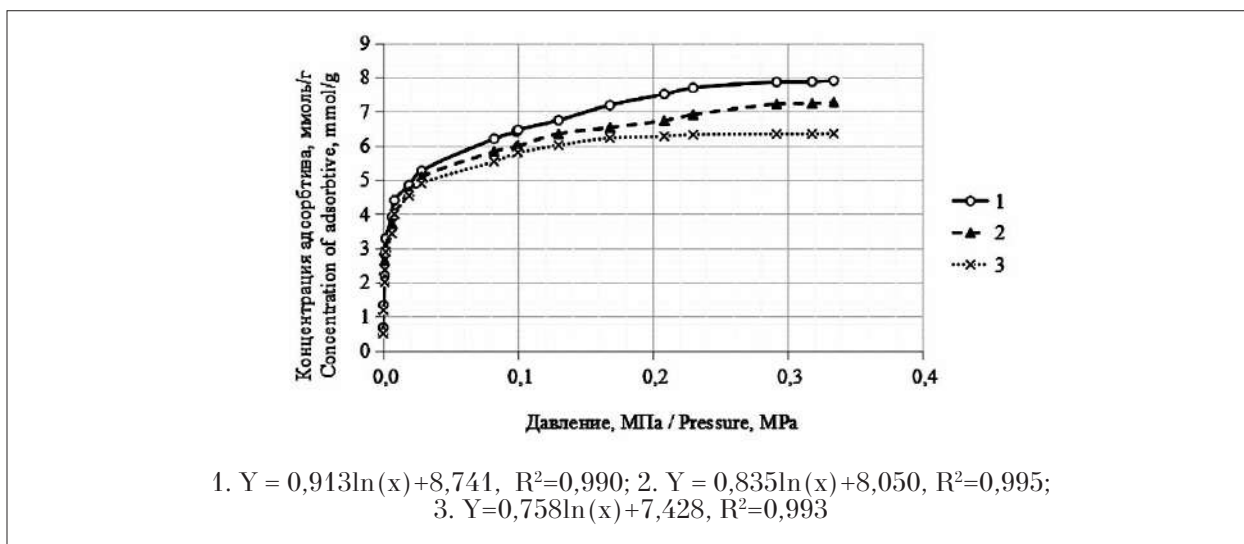


Рис. 3. Изотермы адсорбции CO₂ при температурах: 1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 323 К
 Fig. 3. CO₂ adsorption isotherms at different temperatures: 1 – 293 К; 2 – 313 К; 3 – 323 К

CO₂ при различных скоростях потока газа: 20, 50 и 80 мл/мин.

Как видно из рисунка 4, с увеличением времени адсорбции резко увеличивается безразмерная величина C/C₀ до равновесной величины 1. С уменьшением скорости потока газа равновесное время увеличивается.

На рисунке 5 показаны выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO₂: 5, 10 и 20%.

Как следует из рисунка 5, с уменьшением начальной концентрации CO₂ время равновесия тоже увеличивается. Эти явления вполне соответствуют закономерностям массообменных процессов (газ–твёрдое тело) [14–18].

Из рисунков 4 и 5 видно, что крутизна кривых C/C₀=f(τ) изменяется только в зависимости от скорости газового потока, а от зависимости начальной концентрации CO₂

остаётся почти неизменной. В обоих случаях зависимость от времени контакта изменяется в широких пределах. Это свидетельствует о том, что процесс адсорбции компонентов газовых смесей протекает в условиях нестационарности [19].

Получены соответствующие уравнения зависимости $C/C_0=f(\tau)$ для компонента CO_2 при

различных скоростях потока газа и значениях начальных концентраций, а также изотермы адсорбции при 313 К. Ранее авторами предложено математическое описание процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента, который состоит из уравнений адсорбируемого вещества сплошной фазы и уравнений кинетики [20]. Дифференциальное уравне-

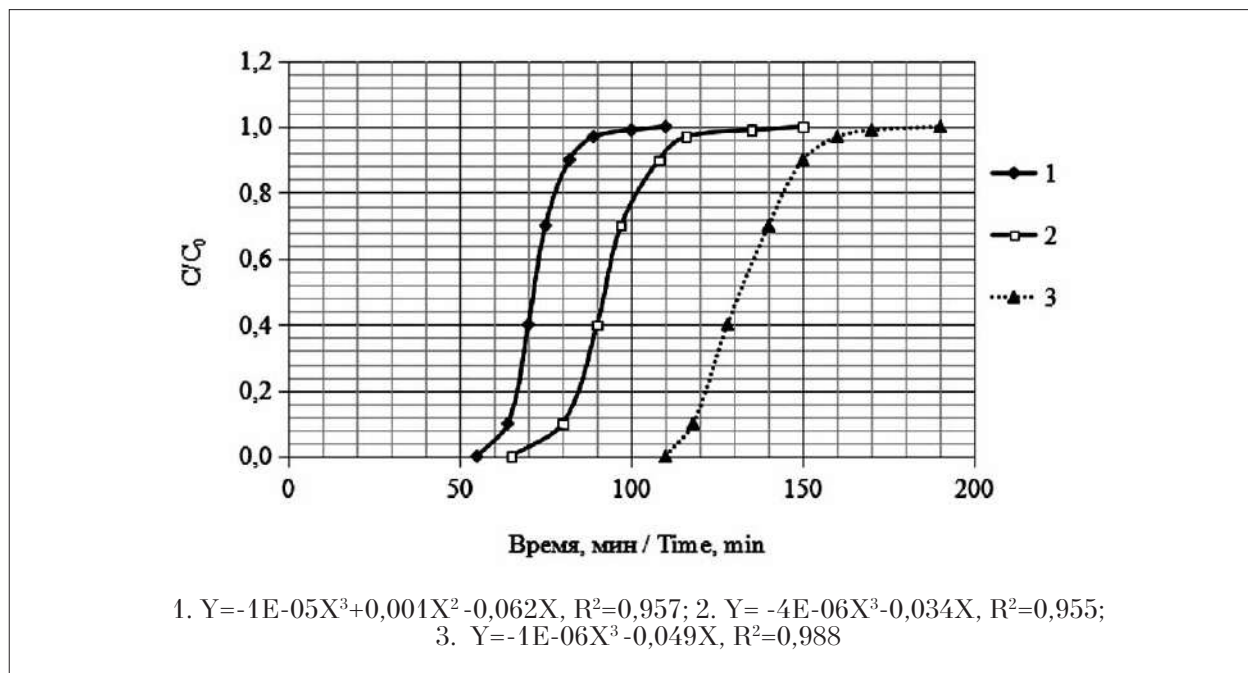


Рис. 4. Выходные кривые адсорбции компонента CO_2 при различных скоростях потока газа: 1 – 80 мл/мин; 2 – 50 мл/мин; 3 – 20 мл/мин
Fig. 4. Output curves of the adsorption of the CO_2 component at various gas flow rates: 1 – 80 mL/min; 2 – 50 mL/min; 3 – 20 mL/min

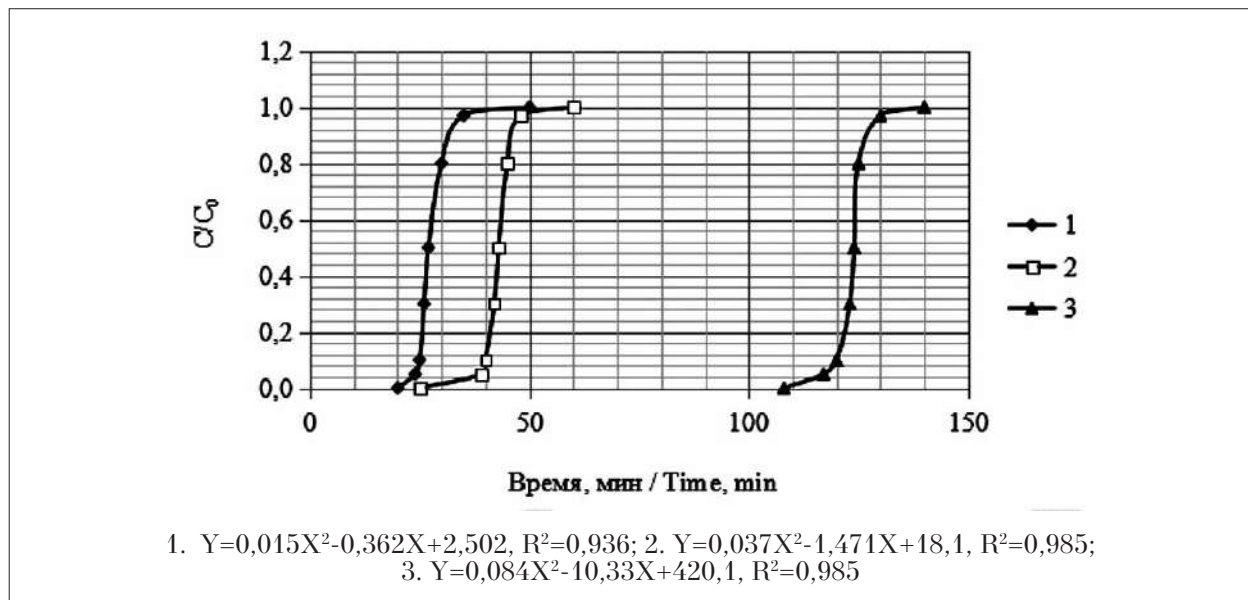


Рис. 5. Выходные кривые в зависимости от начальных концентраций CO_2 : 1 – 20%; 2 – 10%; 3 – 5%
Fig. 5. Output curves as a function of initial CO_2 concentrations: 1 – 20%; 2 – 10%; 3 – 5%

ние баланса адсорбируемого вещества можно представить в виде:

$$\frac{\partial(a+C)}{\partial t} + \vartheta \frac{\partial C}{\partial X} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}, \quad (1)$$

Граничные и начальные условия для уравнения (1):

$$\text{при } X=0, C=C_0, a=a_0, \quad (2)$$

$$\text{при } t=0, C=0, a=0, \frac{\partial C}{\partial X} = 0, \quad (3)$$

Уравнение, учитывающее кинетику процесса, можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(C-a), \quad (4)$$

Переменные a и C являются функциями расстояния:

$$\xi = x - \vartheta t, \quad (5)$$

В неподвижном слое связь между a и C описана соотношением Зельдовича:

$$a = \frac{a_0}{c_0} C \quad (6)$$

В результате решения системы уравнений (1–4) получаем:

$$C = C_0 \left(1 - \frac{C}{C_0}\right)^{\frac{b}{b+C_0}} \cdot e^{-\frac{\beta}{4} \frac{C_0}{b+C_0} \xi} \quad (7)$$

где C – концентрация компонента в подвижной фазе, мас. %; a – концентрация адсорбируемого вещества в твёрдой фазе, мас. %; C_m – предельное количество адсорбтива, мас. %; P – давление, МПа; b – константа; X – высота слоя адсорбента, м; t – время, с; D_e – эффективный коэффициент продольной диффузии, также и конвективное перемешивание вдоль адсорбера, м²/с; ϑ – линейная скорость потока, м/с; a_0 – начальная концентрация адсорбата, мас. %; C_0 – начальная концентрация адсорбтива, мас. %; β – константа кинетики процесса, с⁻¹; ξ – расстояние, м. Индексы: 0 – начальное значение; e – эффективный; m – предельное значение.

На основе проведённых экспериментов определены изотермы адсорбции (H₂S, CO₂, CH₄, N₂). Изотермы адсорбции соответствуют Лэнгмюровским [21–23]. Также выявлены выходные кривые адсорбции в зависимости от скоростей газа и начальных концентраций в газовой смеси. Соответственно получены

уравнения в общем виде $C/C_0=f(\tau)$. Полученные уравнения $C/C_0=f(P)$ и $C/C_0=f(\tau)$ учитывают нестационарность процесса адсорбции газовых смесей [24–26].

Выявлено, что величины адсорбции разных компонентов газовых смесей для природного клиноптилолита месторождений Ай-Даг согласуются с физико-химическими свойствами изученных компонентов газовых смесей и сорбируются в сторону уменьшения: H₂S → CO₂ → CH₄ → N₂.

Коэффициенты уравнений найдены на основе системы «Matlab» в среде «Optimization Toolbox» [22]. Так, например, для компонента CO₂ (при 313 К) скорости газового потока 80 мл/мин и начальной концентрации CO₂, C₀=5% получены следующие уравнения, учитывающие нестационарность:

$$C = C_m \cdot \frac{0,237 \cdot P}{1 + 0,237 \cdot P}$$

$$C = C_m \cdot 0,237 \cdot P / (1 + 0,237 \cdot P) \quad (8)$$

$$C/C_0 = 1E - 05 \cdot \tau^3 + 0,0028 \cdot \tau^2 - 0,105 \cdot \tau + 1,135 \quad (9)$$

$$C/C_0 = 6E - 05 \cdot \tau^4 - 0,008 \cdot \tau^3 + 0,387 \cdot \tau^2 - 7,887 \cdot \tau + 57,58 \quad (10)$$

Заключение

Защита окружающей среды от загрязнений вредными выбросами промышленности является глобальной проблемой, решение которой связано с созданием экологически чистых производств.

С этой целью разработана модель оптимального проектирования промышленных адсорберов для адсорбционного разделения газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

На основании проведённых нами исследований адсорбционного разделения газовых смесей (H₂S, CO₂, CH₄, N₂) установлено, что компоненты газовых смесей сорбируются в сторону уменьшения: H₂S → CO₂ → CH₄ → N₂.

Полученная нами ранее система уравнений модели [20] и 1–7, описывающая адсорбционное разделение газовых смесей в неподвижном слое адсорбента, совместно с уравнениями 8–10 представляет полную математическую модель рассматриваемого процесса в нестационарных условиях.

Предложенные модели оптимального проектирования промышленных адсорберов можно использовать для адсорбционного раз-

деления газовых смесей в условиях нестационарного их протекания.

References

- Keltsev N.V. The basics of adsorption technology. Moskva: Chemistry, 1984. 592 p. (in Russian).
- Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Matveikin V.G. Modeling and optimization of cyclic adsorption enrichment of gas mixtures with hydrogen // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. V. 53. No. 5. P. 781–792. doi: 10.1134/S0040579519040195
- Sarker A.J., Aroonwilas A., Veawab A. Equilibrium and kinetic behaviour of CO₂ adsorption onto zeolites carbon molecular sieve and activated carbons // Energy Procedia. 2017. V. 114. P. 2450–2457. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1394
- Mulgundmath V.P., Jones R.A., Tezel F.H., Thibault J. Fixed bed adsorption for the removal of carbon dioxide from nitrogen: Breakthrough behavior and modelling for heat and mass transfer // Separ. Purific. Tech. 2012. V. 85. P. 17–23. doi: 10.1016/j.seppur.2011.07.038
- Li Y., Yi H., Tang X., Li F., Yuan Q. Adsorption separation of CO₂/CH₄ gas mixture on the commercial zeolites at atmospheric pressure // Chem. Eng. J. 2013. V. 229. P. 50–56. doi: 10.1016/j.cej.2013.05.101
- Song Ch., Kausha Y., Oshizuka M., Fu Q., Tsutsumi A. Conceptual design of a novel pressure swing CO₂ adsorption process based on self-heat recuperation technology // Chem. Eng. Proc. 2015. V. 94. P. 20–28. doi: 10.1016/j.cep.2015.03.008
- Marx D., Joss L., Casas N., Schell J., Mazzotti M. Prediction of non-isothermal ternary gas phase breakthrough experiments based on binary data // Adsorption. 2014. V. 20. P. 493–503. doi: 10.1007/s10450-013-9593-5
- Yi H., Wang Z., Liu H., Tang X., Ma D., Zhao S., Zhang B., Gao F., Zuo Y. Adsorption of SO₂, NO, and CO₂ on activated carbons: equilibrium and thermodynamics // J. Chem. Eng. Data. 2014. V. 59. No. 5. P. 1556–1563. doi: 10.1021/je-4011135
- Perdana I., Creaser D., Ohrman O., Hedlung J. A comparison of NO_x adsorption on Na, H and BaZSM-5 films // App. Cat. 2007. V. 72. No. 1–2. P. 82–91. doi: 10.1016/j.apcatb.2006.09.016
- Silva J.A., Cunha A.F., Schumann K., Rodrigues A.E. Binary adsorption of CO₂/CH₄ in binder less beads of 13X zeolite // Microporous Mesoporous Mater. 2014. V. 187. P. 100–107. doi: 10.1016/j.micromeso.2013.12.017
- Hefti M., Marx D., Joss L., Mazzotti M. Adsorption equilibrium of binary mixtures of carbon dioxide and nitrogen on zeolites ZSM-5 and 13X // Microporous Mesoporous Mater. 2015. V. 215. P. 215–228. doi: 10.1016/j.micromeso.2015.05.044
- Krishna R., Long J.R. Screening metal-organic frameworks by analysis of transient breakthrough of gas mixtures in a fixed bed adsorbed // Phys. Chem. 2011. V. 115. No. 26. P. 12941–12950. doi: 10.1021/jp202203c
- Jang S.Ch., Yang S.I., Oh S.G., Choi D.K. Adsorption dynamics and effects carbon to zeolite ratio of layered beds for multicomponent gas adsorption // Korean J. Chem. Eng. 2011. V. 28. No. 2. P. 583–590. doi: 10.1007/s11814-010-0399-9
- Benjamin S.F., Roberts C.A. Three-dimensional modeling of NO_x and particulate traps using CFD: A porous medium approach // Applied Math. Mod. 2007. V. 31. No. 11. P. 2446–2460. doi: 10.1016/j.apm.2006.10.015
- Casas N., Schell J., Pini R., Mazzotti M. Fixed bed adsorption of CO₂/H₂ mixtures on activated carbon: experiments and modeling // Adsorption. 2012. V. 18. P. 143–161. doi: 10.1007/s10450-012-9389-z
- Pham T.D., Liu Q., Lobo R.F. Carbon dioxide and nitrogen. Adsorption on cation – exchanged SSZ-13 zeolites // Langmuir. 2013. V. 29. No. 2. P. 832–839. doi: 10.1021/la304138z
- Mulgundmath V., Tezel F.H. Optimization of carbon dioxide recovery from flue gas in a TPSA // Adsorption. 2010. V. 16. P. 587–598. doi: 10.1007/s10450-010-9255-9
- Maghsoudi H., Soltanieh M. Simultaneous separation of H₂S and CO₂ from CH₄ by a high silica CHA-type zeolite membrane // Mem. Sci. 2014. V. 470. P. 159–165. doi: 10.1016/j.memsci.2014.07.025
- Pham T.D., Xiong R., Sandler S.I., Lobo R.F. Experimental and computational studies on the adsorption of CO₂ and N₂ on pure silica zeolites // Micro. Meso. Mat. 2014. V. 185. P. 157–166.
- Yusubov F.V., Babaev R.K., Akhundov E.A., Mamedov E.A. Optimization of adsorption processes in the oil and gas industry // Chem. Technol. Fuels Oils. 2012. V. 48. P. 156–161. doi: 10.1007/s10553-012-0352-1
- Hauchhum L., Mahanta P. Carbon dioxide adsorption on zeolites and activated carbon by pressure swing adsorption in a fixed bed // Int. J. Ener. and Envir. Eng. 2014. V. 5. P. 349–355. doi: 10.1007/s40095-014-0131-3
- Potemkin V.G. MATLAB system. Reference manual. Moskva: Dialog-MIFI, 1998. 350 p. (in Russian).
- Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. Numerical study of the dynamics and optimization of the modes of air adsorption separation and oxygen concentration // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. V. 81. No. 1. P. 310–317 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-310-317
- Dvoretzkiy S.I., Dvoretzkiy D.S., Akulinin E.I., Usachev V.B., Belyaev V.A. Sorption dynamics modeling in cyclic adsorption processes of gas mixture separation // Transactions TSTU. 2023. V. 29. No. 3. P. 425–443 (in Russian). doi: 10.17277/vestnik.2023.03.pp.425
- Ding Z., Han Z., Fu Q., Shen Y. Optimization and analysis of the VPSA process for industrial-scale oxygen production // Adsorption. 2018. V. 24. P. 499–516. doi: 10.1007/s10450-018-9956-z
- Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomskey K.O. Cleaning gas emissions from CO₂ through trifluoroacetic acid in oil and gas production // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020. V. 331. No. 5. P. 57–63 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2020/5/2636

Оценка химического состава сапропелей различных месторождений

© 2024. А. В. Сазанов¹, к. б. н., и. о. зав. кафедрой,
М. Л. Сазанова^{1,2}, к. б. н., доцент, н. с.,
И. А. Жуйкова¹, к. г. н., доцент,
Л. В. Тугаринов³, руководитель научного отдела,
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,
³ООО «НПО АХП»,
656065, Россия, г. Барнаул, ул. Попова, д. 98а,
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

Устойчивый органоминеральный комплекс и широкие возможности добычи обуславливают применение сапропелей и продуктов на их основе в различных отраслях народного хозяйства. С целью изучения пригодности сапропелей для изготовления гуминовых удобрений проанализирован химический состав сапропелевых отложений из 4 пресноводных озёр, располагающихся в пределах широтного отрезка 53–56° с. ш., в условиях умеренного климатического пояса. Результаты анализа химического состава сапропелей из различных месторождений свидетельствуют о среднем содержании органического вещества в их составе, что позволяет отнести сапропели к классу органо-глинистых и определяет возможность их применения для почв лёгкого гранулометрического состава. Сравнительно высокое содержание гуминовых и фульвокислот обуславливает возможность использования исследованных образцов сапропелей для изготовления гуминовых препаратов. Невысокое содержание Р и К может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из изученных видов сапропеля; избежать этого можно при добавлении к сапропелям навоза или обогащении их минеральными удобрениями. Содержание микроэлементов в изученных сапропелях находится в пределах установленных норм и обуславливает возможность их применения для восполнения дефицита микроэлементов в дерново-подзолистых почвах.

Ключевые слова: сапропель, гуминовые кислоты, микроэлементы, удобрения, гуминовые препараты.

Chemical composition assessment of sapropels from different deposits

© 2024. A. V. Sazanov¹ ORCID: 0000-0002-6934-3330^{*}
M. L. Sazanova^{1,2} ORCID: 0000-0003-3492-8395^{*}
I. A. Zhuikova¹ ORCID: 0000-0001-7855-604X^{*}
L. V. Tugarinov³ ORCID: 0009-0001-5523-3683^{*}
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
³LLC “Agrokhimprom Scientific and Production Assotiation”,
98a, Popova St., Barnaul, Russia, 656065,
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

sapropels' suitability for the production of humic fertilizers. Using validated methods we analyze chemical composition of sapropel sediments from 4 freshwater lakes located within the latitudinal section of 53–56° N in the temperate climate. Microbiological parameters of all studied samples are within the normal range. Dry matter content in the range of 46.1–51.3% corresponds to the normative indicators. The mass fraction of organic matter varies in the range of 31.8–39.9% DM. This allows classifying all samples as organo-clay, and determines the possibility of their use for soils of light granulometric composition. The relatively high content of humic (18.3–22.9% DM) and fulvic acids (3.7–6.4% DM) makes it possible to use the studied sapropel samples for the manufacture of humic preparations (especially, a sapropel sample of the lake Chervonoe, Belarus). Low P and K content (0.24–0.36% DM and 0.32–0.42% DM, respectively) can negatively affect the efficiency of fertilizers from these sapropel species; this can be avoided by mixing sapropel with manure or enrichment with mineral fertilizers. Indicators of heavy metal (Cu, Mn, Zn, Co, Pb and Cd) content in all studied samples meet the safety requirements. Samples from deeper layers of the Rusaki Lake (Altai Territory) and the Beloe Lake (Novosibirsk Region) refer to the 1st class of suitability, the rest (according to a number of indicators) – to the 2nd class. The content of trace elements in the studied sapropels is within the established norms and makes it possible to use them for replenishing the deficit of trace elements in soils. In general, all the studied samples can be used as environmentally friendly organomineral fertilizers, as well as production of humic preparations to increase in the biological and energy capacity of agrocenoses and to reproduce the soil fertility.

Keywords: sapropel, humic acids, trace elements, fertilizers, humic preparations.

Сапропели – органо-минеральные отложения водоёмов, которые образовались в результате биохимических, микробиологических и механических процессов [1]. В настоящее время в России разведано более 50 тыс. месторождений с прогнозными запасами более 250 млрд м³ [2]. Сапропели имеют сложный химический состав, включающий как органические (гуминовые кислоты (ГК), фульвокислоты (ФК), битумы, декальцинат, аминокислоты, целлюлоза, гемицеллюлозы, витамины А, Е, D, С, группы В и др.), так и неорганические (макро- и микроэлементы) компоненты [3, 4]. Устойчивый органо-минеральный комплекс и широкие возможности его добычи обуславливают применение сапропелей и продуктов на их основе в различных отраслях экономики.

С середины прошлого века сапропель нашёл применение в сельском хозяйстве, садоводстве, лесоводстве [4]. Установлено, что внесение в почву сапропеля и продуктов на его основе стимулирует рост растений и увеличивает накопление сухого вещества [4–7], увеличивает энергию прорастания семян [8, 9], обеспечивает положительный баланс азота и фосфора и снижает дефицит элементов питания [10]. Активно развивается производство жидких удобрений на основе сапропеля, содержащих комплекс биологически активных веществ, которые стимулируют рост растений [4, 11], а также повышают устойчивость культур к ряду заболеваний [12]. Так, интродукция ультрадисперсной гуминовой суспензии сапропеля позволяет повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды, в частности, снижает накопление Cu, и делает возможным возделывание растений на загрязнённых медью почвах [13]. По данным [14], гуминовые вещества сапропеля

обладают значительной радикалопоглощающей активностью и металлосвязывающей способностью.

Совершенствуются методики извлечения компонентов из сапропелей. Так, в дополнение к традиционной экстракции гуминовых веществ и аминокислот щелочными растворами (NaOH, KOH, pH 10–11) [4, 14, 15], предлагается использование ультразвука; при этом снижается количество используемой щёлочи, а процесс проводится при комнатной температуре и нормальном давлении, что делает его экологически безопасным [16]. Комплексная переработка сапропеля с использованием сверхкритической CO₂-экстракции позволяет извлекать ценные аминокислоты, а путём дальнейшей карбонизации твёрдого остатка можно получать широкопористые сорбенты для очистки сточных вод, удаления тяжёлых металлов и нефтепродуктов из почв и т. п. [17]. Непригодный для получения ГК карбонатный сапропель может быть использован в качестве раскислителя почв [18–20], для повышения уровня влажности и общей пористости почвы вне зависимости от метеорологических условий [20], а также в составе кормовых добавок для животных [4] и как сырьевой компонент для получения регуляторов роста растений [19].

Классификация сапропелей, обычно принятая в геологии, основывается на указании преобладающего химического состава: карбонатный, кремнезёмистый, органический, железистый [1]. Состав органической массы сапропеля зависит от месторождения и позволяет классифицировать органический, органо-глинистый, органо-кремнезёмистый, органо-известковистый и известковый виды (ГОСТ Р 5400-2010). Состав минеральной части сапропеля в первую очередь зависит от географического положения и геохимического

состава отложений региона; условий формирования и возраста озёрной толщи; химического состава воды, поступающей в озёрную котловину водоёма; химического состава гидробионтов и околводных организмов [21].

Целью нашего исследования стал анализ химического состава сапропелей различных месторождений для производства гуминовых удобрений.

Материалы и методы исследования

Образцы сапропелей для анализа предоставлены ООО «НПО АХП». В каждом водоёме донные отложения отбирались промышленным способом (ГОСТ 17644-83). Отобранную генеральную пробу готовили к исследованию согласно [22]. Всего проанализировано 6 образцов сапропелей из четырёх озёр:

№№ 1, 2 – оз. Русаки, Панкрушихинский р-н, Алтайский край (53°52'42" N, 80°31'29" E). Бессточное. Образцы отобраны из фракций с разной глубины: до 50 см (№ 1) и глубже 50 см (№ 2).

№№ 3, 4 – оз. Белое, Колыванский р-н, Новосибирская область (55°23'22" N, 82°41'50" E). Находится на территории Колывань-Томской возвышенности в лесостепной зоне. Бессточное, неглубокое, с очень сильно развитой водной растительностью (от 70 до 95% площади озера). Общие запасы органогенных отложений составляют 321 тыс. т [23]. Образцы отобраны из фракций с разной глубины: до 50 см (карбонатный слой отложений) (№ 3) и глубже 50 см (органический слой) (№ 4).

№ 5 – оз. Червоное, Житковичский р-н, Гомельская область, Беларусь (52°24'17" N, 27°58'25" E). Неглубокое (0,6–2,9 м). Имеет сток в реку. Припять по дренажным каналам и р. Бобрин. Берега низкие, торфянистые. Дно сапропелистое (мощность сапропеля 2,03–6,5 м, запасы около 70 млн м³) [24].

№ 6 – оз. Убаговас, Резекненский край, Латгалия, Латвия (56°27'23" N, 27°42'14" E). Располагается в низменной заболоченной местности, в пределах Латгальской возвышенности. Максимальная глубина озера 2,3 м, сток осуществляется в оз. Разна. Ведётся разработка сапропеля [25].

Все исследованные озёра располагаются в пределах широтного отрезка 53–56° N, в условиях умеренного пояса, охватывают пространство от 27° E (Средняя Европа) до 82° E (Средняя Сибирь), что отражается в изменении климата, термического и гидрологическо-

го режима водоёмов, в которых происходило формирование сапропелевых отложений. Большинство представленных озёр относятся к малым и мелководным водоёмам (с глубиной 2–3 м), где формируются достаточно продуктивные системы и накапливаются преимущественно донные осадки в виде сапропеля.

Анализ образцов сапропелей проведён в аккредитованных экоаналитической лаборатории и лабораториях центра компетенции «Экологические технологии и системы» Института химии и экологии Вятского государственного университета в 2020–2023 гг. по аттестованным методикам. В каждом образце определяли индекс санитарно-показательных микроорганизмов, кл/г, наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, кл/г, наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, экз./кг [26, 27]. Определена массовая доля сухого вещества, % (ГОСТ 26713-85); массовая доля органического вещества, % (ГОСТ 27980-88); содержание ГК (в пересчёте на сухое вещество), % (ГОСТ 9517-94, ГОСТ 54221-2010), содержание ФК (в пересчёте на сухое вещество), % [28]. Оценено содержание макроэлементов: калия, % (K₂O, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26718-85), азота общего, % (N₂, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26715-85), фосфора общего, % (P₂O₅, в пересчёте на сухое вещество; ГОСТ 26717-85), серы, % (SO₃, в пересчёте на сухое вещество; [22]). Химико-токсикологические показатели включали оценку содержания Fe, % (Fe₂O₃, в пересчёте на сухое вещество; [22]) и тяжёлых металлов (Pb, Cd, Cu, Mn, Zn, Co), мг/кг (по ГОСТ 53218-2008, [29]).

Аналитические исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Microsoft Excel; достоверность различий ($p < 0,05$) оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Согласно результатам, микробиологические показатели всех исследованных образцов находятся в пределах нормы: индекс санитарно-показательных микроорганизмов не превышает 8 (норма – не более 9), патогенные и болезнетворные микроорганизмы, жизнеспособные яйца и личинки гельминтов не обнаружены, что делает возможным использование данных сапропелей для производства удобрений и гуминовых препаратов.

Химический состав исследованных образцов сапропелей
Chemical composition of the studied sapropel samples

Показатель Indicator	Образец / Sample					
	1	2	3	4	5	6
Сухое вещество, % Dry matter, %	50,8 ±4,6	51,3 ±4,9	49,3 ±3,8	46,1 ±4,4	50,3 ±3,9	48,6 ±4,2
Органическое вещество, %* Organic matter, % DM	39,9 ±3,6	39,6 ±3,5	37,8 ±3,5	31,8 ±3,1	39,1 ±3,5	36,5 ±3,4
Гуминовые кислоты, % Humic acids, % DM	21,2 ±1,9	20,6 ±1,8	21,5 ±1,5	18,3 ±2,0	22,9 ±1,9	20,7 ±1,7
Фульвокислоты, % Fulvic acids, % DM	5,1 ±0,3	5,4 ±0,3	6,0 ±0,5	3,7 ±0,3 1,2,3	6,4 ±0,5 4	5,80 ±0,4 4
N _{общ.} , % N _{total} , % DM	1,27 ±0,2	1,36 ±0,4	1,46 ±0,15	1,24 ±0,4	1,24 ±0,12	1,32 ±0,19
P _{общ.} , % P _{total} , % DM	0,34 ±0,03	0,3 ±0,02	0,32 ±0,02	0,24 ±0,03	0,36 ±0,03	0,30 ±0,02
K _{общ.} , % K _{total} , % DM	0,40 ±0,03	0,36 ±0,02	0,32 ±0,01	0,39 ±0,03	0,42 ±0,03 3	0,35 ±0,02
S (SO ₃), % DM	4,1 ±0,18	3,6 ±0,17	4,3 ±0,17 2	4,2 ±0,23	4,33 ±0,15 2	4,4 ±0,19 2
Fe (Fe ₂ O ₃), % DM	12,5 ±0,8	15,1 ±1,1	9,3 ±0,5 1,2	17,6 ±1,3 1,3	8,0 ±0,4 1,2,4	10,1 ±0,6 2,4,5
Cu, мг/кг / mg/kg	60,4 ±0,7	52,8 ±0,5 1	116,8 ±3,1 1,2	37,2 ±0,3 1-3	104,1 ±0,8 1-4	94,3 ±0,6 1-5
Mn, мг/кг / mg/kg	282,6 ±10,2	306,9 ±12,5	210,5 ±7,0 1,2	124,2 ±0,8 1-3	184,0 ±5,5 1-4	233,2 ±9,7 1,2,4,5
Zn, мг/кг / mg/kg	116,0 ±11,7	85,8 ±8,3	104,6 ±8,7	92,5 ±0,5	66,1 ±5,9 1,3,4	95,8 ±8,4 5
Co, мг/кг / mg/kg	24,5 ±0,6	12,8 ±0,3 1	20,2 ±0,4 1,2	4,3 ±0,1 1-3	12,5 ±0,3 1,3,4	29,2 ±0,7 1-5
Pb, мг/кг / mg/kg	39,2 ±1,4	23,7 ±0,6 1	54,3 ±1,9 1,2	16,1 ±0,2 1-3	38,4 ±1,3 1,3,4	42,5 ±1,6 1,3,4
Cd, мг/кг / mg/kg	2,1 ±0,2	1,6 ±0,1	3,9 ±0,1 1,2	–	5,4 ±0,1 1,2,3	5,4 ±0,1 1,2,3

Примечание. * – здесь и далее показатель в % указан в пересчёте на сухое вещество. Жирным шрифтом выделены значения 2 класса пригодности. Под чертой – достоверные отличия с соответствующими образцами. Прочерк означает менее предела обнаружения.

Note. * – here and below the indicator in % is given in terms of dry matter. Values of suitability class 2 are marked in bold. Under the line – reliable differences with the corresponding samples. A dash indicates less than the detection limit.

Основные результаты исследования химического состава сапропелей приведены в таблице. Содержание сухого вещества во всех образцах находилось в пределах 46,1–51,3%, что соответствует норме (не менее 40%).

Массовая доля органического вещества в исследованных озёрных сапропелях варьирует в пределах 31,8–39,9%, что позволяет отнести все образцы к группе органо-глинистых. Глинистые частицы обеспечивают высокую

водоудерживающую и низкую фильтрационную способность сапропеля, что положительно сказывается на улучшении водно-физических свойств лёгких (супесчаной и среднесуглинистой) почв [30]. Однако высокое содержание глинистых частиц в сапропелях затрудняет производство гуминовых препаратов из них. В частности, во избежание загустевания препарата требуется повышать температуру и количество используемой для экстракции щёлочи, что, в свою очередь, приводит к разрушению большинства биологически активных веществ. Использование деспергаторов позволяет решить проблему, но значительно увеличивает стоимость препарата и снижает его «экологическую чистоту».

Содержание ГК варьировало в пределах 18,3–22,9% (в пересчёте на сухое вещество). Наибольшее количество ФК отмечено для образца № 5 ($6,4 \pm 0,5\%$), наименьшее – для образца № 4 ($3,7 \pm 0,3\%$ в пересчёте на сухое вещество; достоверно отличается от значений, полученных для других образцов). В сравнении с гуминовыми кислотами ФК имеют более низкую молекулярную массу, а их химическая активность объясняется высоким содержанием кислорода, карбоксильных и гидроксильных групп. Хелатирующие свойства ФК в сочетании с нетоксичностью, эффективностью при низких концентрациях повышают ценность содержащих их гуминовых препаратов [31]. Сравнительно высокое содержание ГК и ФК обуславливает возможность использования исследованных образцов (в первую очередь, образца № 5 с высоким содержанием ГК и ФК) для изготовления гуминовых препаратов: удобрений, сорбентов, продуктов для санации и ремедиации почв, продуктов для химической промышленности, биосовместимых плёнок и т. п. [32].

В исследованных образцах общее содержание основных элементов минерального питания растений находилось в пределах требований ГОСТ 54221-2010 и составляло (в пересчёте на сухое вещество): $N_{\text{общ.}} - 1,27-1,46\%$, $P_{\text{общ.}} - 0,24-0,36\%$, $K_{\text{общ.}} - 0,32-0,42\%$. По данным [18], общее содержание биогенных элементов – азота, фосфора, калия – определяет агрохимическую эффективность сапропелей. Невысокое содержание P и K может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из данных видов сапропеля; избежать этого можно при смешивании сапропеля с навозом или обогащении минеральными удобрениями [2].

Содержание серы в пределах 3,6–4,4% (в пересчёте на сухое вещество) незначитель-

но превышало установленный норматив (не более 3%). Учитывая относительно высокое содержание железа (8,0–17,6%, в пересчёте на сухое вещество), вышеуказанное можно объяснить накоплением биологически активных S и Fe в различных слоях сапропеля в результате минерализации (в основном, микробиологической) органического вещества сапропеля [33].

Показатели содержания тяжёлых металлов, в том числе, эссенциальных Cu, Mn, Zn, Co, во всех исследованных образцах отвечают требованиям безопасности (ГОСТ 54000-2010) и позволяют отнести образцы № 2 и № 4 к 1 классу пригодности, остальные (по ряду показателей) – ко 2 классу (табл.).

Повышенное содержание Co в образце № 2 (24,5 мг/кг) может быть связано с особенностями геохимического состава почвообразующих пород и почв региона (Алтайский край). Так, по данным [34], содержание Co в почвах региона, где был отобран образец № 2, высокое: от 23,0 мг/кг в бурых лесных до 29,0 мг/кг в серых лесных почвах; кроме того, Co хорошо сорбируется гидроокислами Fe и особенно Mn, а также глинистыми минералами. Кобальт является эссенциальным микроэлементом для многих культур, в первую очередь, бобовых. В целом, под действием Co повышается активность ряда ферментов (дегидрогеназ, гидрогеназы, нитратредуктазы), увеличивается содержание хлорофилла, общего гематина и связанного с хлорофиллом витамина E и т. д. [35]. Наиболее бедны подвижными, доступными растению соединениями Co дерново-подзолистые почвы лёгкого гранулометрического состава; при известковании почв потребность в Co возрастает [36, 37], в связи с чем образец № 2 подходит в качестве органоминерального удобрения для вышеуказанного типа почв.

Высокое содержание меди в образце № 3 (116, 8 мг/кг), в отличие от образца № 4 (37,2 мг/кг), можно объяснить разной глубиной забора проб сапропеля. По данным [23], повышенное содержание Cu в верхних интервалах сапропеля оз. Белое является следствием концентрационной функции живого вещества, которое при отмирании поступает в осадок. В местах разложения растительных остатков наблюдается восстановительная обстановка, способствующая осаждению Cu [23]. С другой стороны, осаждение Cu может быть связано с сорбцией органическими веществами (образованием внутрикомплексных нерастворимых соединений ГК с медью), а также гидроокислами железа и марганца [21].

Третьей причиной может быть антропогенное воздействие, которое способствует накоплению летучих соединений Си в атмосферном аэрозоле, а при выпадении атмосферных осадков Си накапливается в гидробионтах – поставщиках органического вещества. В более глубоких горизонтах донных отложений отмечается резкое падение концентрации Си, что обусловлено её выщелачиванием из осадка в поровую воду [23].

Медь в оптимальных концентрациях является эссенциальным микроэлементом, важным кофактором ряда ферментов, которые выполняют ключевые функции в метаболизме растительных клеток [38, 39]. С другой стороны, при избыточном поступлении медь является токсичным металлом: окислительно-восстановительные циклы между Cu^{2+} и Cu^+ увеличивают продукцию высокотоксичных гидроксильных радикалов с последующим повреждением клеток на уровне липидов, мембран, нуклеиновых кислот, белков и других биомолекул [39]. В связи с этим, при внесении в почвы сапропеля (особенно с низким содержанием гуминовых кислот) в качестве удобрений важно учитывать исходный уровень меди в почвах.

Высокое содержание Pb в образце № 3 (54,3 мг/кг), в отличие от образца № 4 (16,1 мг/кг) также объясняется разной глубиной забора проб сапропеля (образец № 3 – из верхних слоёв осадка). В целом, повышенное содержание Pb в образце № 3 и Cd в образцах № 5 и № 6 можно объяснить антропогенным воздействием на озёрные экосистемы [15, 23, 33, 40, 41]. Подобные результаты получены при изучении накопления Cd в сапропелях озёр восточной Сибири [23, 33], Латвии [40], Карелии [41]. Так, анализ вертикального распределения кадмия в малых озёрах Карелии показал, что рост его концентрации фиксируется в верхней части разрезов и датируется началом XX века; основной источник поступления кадмия – воздушный перенос (иногда на сотни км) от сжигания ископаемого угля [41].

Заключение

Изучение химического состава сапропелей из различных месторождений показало среднее содержание в них органического вещества, что позволяет отнести их к классу органо-глинистых и определяет возможность их применения в качестве удобрений для почв лёгкого гранулометрического состава. Сравнительно высокое содержание гуминовых и

фульвокислот обуславливает возможность использования исследованных образцов сапропелей (в первую очередь, образец из оз. Червоное с высоким содержанием ГК и ФК) для изготовления гуминовых препаратов. Не-высокое содержание азота, фосфора и калия может отрицательно сказаться на эффективности удобрений из данных видов сапропеля, поэтому при производстве удобрений рекомендуется обогащать сапропель минеральными удобрениями, содержащими N, P, K. Содержание микроэлементов в изученных сапропелях находится в пределах установленных норм и обуславливает возможность их применения для восполнения дефицита микроэлементов в дерново-подзолистых почвах при условии предварительной оценки содержания тяжёлых металлов в почве.

В целом, все исследованные образцы сапропелей отвечают требованиям стандартов и могут быть использованы в качестве экологически чистых органоминеральных удобрений, а также для производства гуминовых препаратов, применение которых обеспечивает повышение биологической и энергетической ёмкости агроценозов, воспроизводство плодородия почв.

Литература

1. Лопотко М.З. Озёра и сапропель. Минск: Наука и техника, 1978. 88 с.
2. Анисимова Т.Ю. Использование ресурсов торфа и сапропеля в сельском хозяйстве Нечернозёмной зоны России: состояние вопроса и перспективы // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 1. С. 51–58. doi: 10.26178/AE.2022.76.68.004
3. Адеева Л.Н., Коваленко Т.А., Кривонос О.И., Плаксин Г.В., Струнина Н.Н. Определение химического состава сапропеля // Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. № 3. С. 121–123.
4. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Freshwater sapropel (gyttja): its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture // Agronomy Research. 2016. V. 14. No. 3. P. 929–947.
5. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growthaffecting activity and cultivable microorganism content // Zemdirbyste-Agriculture. 2014. V. 101. No. 4. P. 355–366. doi: 10.13080/z-a.2014.101.045
6. Танирбергенов С.И., Сулейменов Б.У., Зэрш З.А. Применение органического гуминового удобрения «Тумат» при возделывании сои // Почвоведение и агрохимия. 2023. № 1. С. 74–85. doi: 10.51886/1999-740X_2023_1_74

7. Никулина А.Н. Возможности использования сапропеля для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур // Известия Горского государственного аграрного университета. 2022. Т. 59. № 3. С. 7–14. doi: 10.54258/20701047_2022_59_3_7
8. Скамарохова А.С., Кравченко Р.В., Юрин Д.А., Свистунов А.А. Результаты проращивания озимой пшеницы, овса и маша с применением нового органического удобрения на основе сапропеля // Научный журнал КубГАУ. 2023. № 189. С. 46–53. doi: 10.21515/1990-4665-189-006
9. Рыбалкина Е.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние сапропеля на биологическую активность каштановой почвы // Агрехимический вестник. 2023. № 4. С. 39–46. doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007
10. Плотников А.М., Созинов А.В. Баланс элементов питания в севообороте при использовании сапропеля, извести, азотно-фосфорного удобрения // Проблемы агрохимии и экологии. 2022. № 3-4. С. 26–31. doi: 10.26178/AE.2022.71.83.003
11. Федосеева Е.В., Терехова В.А., Якименко О.С., Гладкова М.М. Экоотоксикологическая оценка гуминовых препаратов разного происхождения с применением микроводорослей *Scenedesmus quadricauda* // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 4. С. 45–49. doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049
12. Пономарева М.А. Химический состав и пути использования сапропелей Татарстана: автореф. дис. ... канд. хим. наук. СПб, 2002. 20 с.
13. Румянцев В.А., Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Митюков А.С., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г. Влияние ультрадисперсной гуминовой суспензии сапропеля на рост, фотосинтетическую активность и накопление меди горохом (*Pisum sativum* L.) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 1. С. 86–93. doi: 10.31857/S268673972111013X
14. Obuka V., Boroduskis M., Ramata-Stunda A., Klavins L., Klavins M. Sapropel processing approaches towards high added-value products // Agronomy Research. 2018. No. 16 (S1). P. 1142–1149. doi: 10.15159/AR.18.119
15. Pavlovska I., Klavina A., Auce A., Vanadzins I., Silova A., Komarovska L., Silamikele B., Dobkevica L., Paegle L. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances // Scientific Reports. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
16. Кошелев А.В., Головкин В.Ф., Пыжьянов И.В., Елеев Ю.А., Глухан Е.Н. Интенсификация химико-технологических процессов получения гуминовых препаратов при использовании ультразвука // Химия и технология органических веществ. 2023. № 3 (27). С. 69–80.
17. Krivonos O.I., Belskaya O.V. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J. of Supercritical Fluids. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
18. Костенков Н.М. Эколого-агрехимическая оценка осадочных отложений озёр морских террас побережья Японского моря // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 30–34. doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-030-034
19. Курзо Б.В., Кляуззе И.В., Ворона М.В., Серая С.М., Гайдукевич О.М. Использование торфа и сапропеля для получения гуминового регулятора роста растений // Природопользование. 2022. № 1. С. 136–145. doi: 10.47612/2079-3928-2022-1-136-145
20. Daugvilienė D., Burba A., Bakšienė E. Changes of sandy loam Cambisol properties at application for calcareous sapropel and limestone // J. Food Agric. Environ. 2014. V. 12. No. 1. P. 491–495.
21. Успенская О.Н., Васючков И.Ю. Микроэлементы в сапропелях – природном материале на удобрение для органического земледелия // Агрехимия. 2019. № 10. С. 52–57. doi: 10.1134/S0002188119100132
22. Методические указания по агрохимическому анализу сапропелей. М.: ЦИНАО, 1982. 52 с.
23. Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озёр юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2019. 444 с. doi: 10.21782/B978-5-6041446-9-5
24. Курзо Б.В., Гайдукевич О.М. Ресурсы сапропеля Припятского Полесья и перспективы их использования // Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана: материалы международной научно-практической конференции. Пинск: УО «Полесский государственный университет», 2015. С. 166–170.
25. Ubogovas ezers [Электронный ресурс] <https://www.ezeri.lv/database/1075/> (Дата обращения: 23.12.2023).
26. МУК 4.2.796–99. Методы санитарно-паразитологических исследований. Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 67 с.
27. МУ 2293-81. Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы. М., 1981. 14 с.
28. Андреевас З.Ф., Колосов И.В., Соломинская Б.А. Способ получения препаратов гуминовых и фульвокислот из почв // Патент SU 268741 А1. Заявление: 1258774/30-15, 18.07.1968. Дата публикации: 10.04.1970. Бюлл. 14.
29. Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
30. Иванова Ж.А., Костыгова В.В., Пономарёва М.А. Скрытые резервы повышения эффективности земледелия на северо-западе России // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: материалы всерос. научн. конф. с междунар. участием. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. С. 164–170.

31. Nikoogoftar-Sedghi M., Rabiei V., Razavi F., Molaei S., Khadivi A. Fulvic acid foliar application: a novel approach enhancing antioxidant capacity and nutritional quality of pistachio (*Pistacia vera* L.) // BMC Plant Biol. 2024. V. 24. Article No. 241. doi: 10.1186/s12870-024-04974-0

32. Загребин Е.М., Соснов А.В., Землякова М.А., Пуцыкин Ю.Г., Шаповалов А.А. Новые высокотехнологические сорбенты и сорбенты-биодеструкторы на основе гуминовых кислот в качестве средств ремедиации и рекультивации загрязненных почв // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 24–29. doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037

33. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bychinsky V.A., Bobrov V.A., Maltsev A.E., Tikhova V.D., Miroschnichenko L.V., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E. Biogeochemistry and element speciation in sapropel from freshwater Lake Dukhovie (East Baikal region, Russia) // Appl. Geochem. 2022. V. 143. Article No. 105384. doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105384

34. Трошкова И.А., Балыкин С.Н., Пузанов А.В., Салтыков А.В. Железо, кобальт и никель в лесных почвах северо-восточного Алтая // Известия АО РГО. 2023. № 1 (68). С. 43–54.

35. Елькина Г.Я. Кобальт в системе почва–растение на подзолистых почвах европейского северо-востока России // Агрохимия. 2021. № 7. С. 75–82. doi: 10.31857/S000218812107005X

36. Шеуджен А.Х. Аканова Н.И., Бондарева Т.Н. Агрохимия. Ч. 6. Экологическая агрохимия. Майкоп: ООО «Полиграф-ЮГ», 2018. 575 с.

37. Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б. Динамика содержания и распределения микроэлементов в дерново-подзолистых почвах и растениях агроценозов // Агрохимия. 2023. № 8. С. 3–15. doi: 10.31857/S0002188123080100

38. Елькина Г.Я. Содержание аминокислот в растениях при разных уровнях содержания меди в почве // Агрохимия. 2018. № 12. С. 88–96. doi: 10.1134/S0002188118120050

39. Adamczyk-Szabela D., Wolf W.M. The influence of copper and zinc on photosynthesis and phenolic levels in basil (*Ocimum basilicum* L.), borage (*Borago officinalis* L.), common nettle (*Urtica dioica* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.) // Int. J. Mol. Sci. 2024. V. 25. Article No. 3612. doi: 10.3390/ijms25073612

40. Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // Mater. Sci. Appl. Chem. 2012. V. 26. P. 99–105.

41. Слукровский З.И., Даувальтер В.А. Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озёр юга Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 4. С. 75–94. doi: 10.17076/lim1198

References

1. Lopotko M.Z. Lakes and sapropel. Minsk: Nauka i tekhnika, 1978. 88 p (in Russian).

2. Anisimova T.Yu. Use of peat and sapropel resources in agriculture of non-chernozem zone of Russia: status of the issue and prospects // Problems of agrochemistry and ecology. 2022. No. 1. P. 51–58 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2022.76.68.004

3. Adeeva L.N., Kovalenko T.A., Krivonos O.I., Plaksin G.V., Strunina N.N. Determination of the chemical composition of sapropel // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2009. V. 52. No. 3. P. 121–123 (in Russian).

4. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Freshwater sapropel (gyttja): its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture // Agronomy Research. 2016. V. 14. No. 3. P. 929–947.

5. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievins G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growthaffecting activity and cultivable microorganism content // Zemdirbyste-Agriculture. 2014. V. 101. No. 4. P. 355–366. doi: 10.13080/z-a.2014.101.045

6. Tanirbergenov S.I., Suleimenov B.U., Zarip Z.A. Organic humic fertilizer «Tumat» application in the cultivation of soybeans // Soil Science and Agrichemistry. 2023. No. 1. P. 74–85 (in Russian). doi: 10.51886/1999-740X_2023_1_74

7. Nikulina A.S. Opportunities of using sapropel for increasing productivity of crops // Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2022. V. 59. No. 3. P. 7–14 (in Russian). doi: 10.54258/20701047_2022_59_3_7

8. Skamarokhova A.S., Kravchenko R.V., Yurin D.A., Svistunov A.A. The results of germination of winter wheat, oats and mash with the use of a new organic fertilizer based on sapropel // Scientific Journal of KubSAU. 2023. No. 189. P. 46–53 (in Russian). doi: 10.21515/1990-4665-189-006

9. Rybalkina E.I., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Influence of sapropel on biological activity of chestnut soil // Agrochemical Bulletin. 2023. No. 4. P. 39–46 (in Russian). doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007

10. Plotnikov A.M., Sozinov A.V. The balance of nutrition elements in crop rotation with the use of sapropel, lime, nitrogen-phosphorus fertilizer // Agrochemistry and ecology problems. 2022. No. 3-4. P. 26–31 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2022.71.83.003

11. Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Gladkova M.M. Ecotoxicological evaluation of commercial humates of different origin using microalgae *Scenedesmus quadricauda* // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 45–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049

12. Ponomareva M.A. Chemical composition and application possibilities of Tatarstan sapropel: Ph.D. chem. sci. diss. abstr. Sankt-Peterburg, 2002. 20 p. (in Russian).

13. Rumyantsev V.A., Puhalsky Ya.V., Loskutov S.I., Mityukov A.S., Khomyakov Yu.V., Panova G.G. Influence of ultradisperse humic sapropel suspension on growth, photosynthetic activity, and copper accumulation in peas (*Pisum sativum* L.) // Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle. 2021. V. 501. No. 1. P. 86–93 (in Russian). doi: 10.31857/S268673972111013X

14. Obuka V., Boroduskis M., Ramata-Stunda A., Klavins L., Klavins M. Sapropel processing approaches

- towards high added-value products // *Agronomy Research*. 2018. No. 16 (S1). P. 1142–1149. doi: 10.15159/AR.18.119
15. Pavlovska I., Klavina A., Auce A., Vanadzins I., Silova A., Komarovska L., Silamikele B., Dobkevica L., Paegle L. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
16. Koshelev A.V., Golovkov V.F., Pyzhyanov I.V., Eleev Yu.A., Glukhan E.N. Intensification of chemical-technological processes for obtaining humic preparations using ultrasound // *Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2023. No. 3 (27). P. 69–80 (in Russian).
17. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // *J. of Supercritical Fluids*. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
18. Kostenkov N.M. Ecological and Agrochemical estimate of sedimentary deposits of lakes on marine terraces of coast Sea of Japan // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 2. P. 30–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-030-034
19. Kurzo B. V., Klyauzze I. V., Vorona M. V., Seraya S. M., Gaidukevich O. M. Use of peat and sapropel for obtaining humic plant growth regulator // *Nature Management*. 2022. No. 1. P. 136–145 (in Russian). doi: 10.47612/2079-3928-2022-1-136-145
20. Daugvilienė D., Burba A., Bakšienė E. Changes of sandy loam Cambisol properties at application for calcareous sapropel and limestone // *J. Food Agric. Environ.* 2014. V. 12. No. 1. P. 491–495.
21. Uspenskaya O.N., Vasyuchkov I.Yu. Trace elements in sapropel – natural fertilizer material for organic farming // *Agrochemistry*. 2019. No. 10. P. 52–57 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100132
22. Methodical instructions for agrochemical analysis of sapropels. Moskva: CINAО, 1982. 52 p. (in Russian).
23. Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K. Geochemistry of Holocene sapropels from small lakes of the southern Western Siberia and eastern Baikal regions. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, 2019. 444 p. (in Russian). doi: 10.21782/B978-5-6041446-9-5
24. Kurzo B.V., Gaidukevich O.M. Sapropel resources of Pripyat Polesie and prospects for their use // *Natural resources of Polesie: assessment, use, conservation: materials of international scientific-practical conference*. Pinsk: UO “Poleskiy gosudarstvennyy universitet”, 2015. P. 166–170 (in Russian).
25. Ubogovas ezers [Internet resource] <https://www.ezeri.lv/database/1075/> (Accessed: 23.12.2023).
26. MUK 4.2.796-99. Methods of sanitary-parasitological research. Methodical instructions. Moskva: Federal Center of Gossanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia, 2000. 67 p. (in Russian).
27. MU 2293-81. Methodical instructions for sanitary-microbiological examination of soil. Moskva, 1981. 14 p. (in Russian).
28. Andreevas Z.F., Kolosov I.V., Solominskaya B.A. Method of preparation of humic and fulvic acids from soils // Patent SU 2426779 A1. Application: 1258774/30-15, 18.07.1968. Date of publication: 10.04.1970. Bull. 14 (in Russian).
29. Methodical instructions for determination of heavy metals in soils of agricultural lands and crop production. Moskva: CINAО, 1992. 61 p. (in Russian).
30. Ivanova Zh.A., Kostygova V.V., Ponomaryova M.A. Hidden reserves of increase of efficiency of agriculture in the north-west of Russia // *Application of Earth remote sensing in agriculture: materials of Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Sankt-Peterburg: FGBNU AFI, 2018. P. 164–170 (in Russian).
31. Nikoogoftar-Sedghi M., Rabiei V., Razavi F., Molaei S., Khadivi A. Fulvic acid foliar application: a novel approach enhancing antioxidant capacity and nutritional quality of pistachio (*Pistacia vera* L.) // *BMC Plant Biol.* 2024. V. 24. Article No. 241. doi: 10.1186/s12870-024-04974-0
32. Zagrebin E.M., Sosnov A.V., Sadovnikov S.V., Zemlyakova M.A., Putsykin Yu.G., Shapovalov A.A. New high-tech sorbents and biodestructor-sorbents on the basis of humic acid as a means of remediation and reclamation of contaminated soil // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 4. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037
33. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bychinsky V.A., Bobrov V.A., Maltsev A.E., Tikhova V.D., Miroshnichenko L.V., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E. Biogeochemistry and element speciation in sapropel from freshwater Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // *Appl. Geochem.* 2022. V. 143. Article No. 105384. doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105384
34. Troshkova I.A., Balykin S.N., Puzanov A.V., Saltykov A.V. Iron, cobalt and nickel in forest soils of the North-Eastern Altai // *Bulletin AB RGS*. 2023. No. 1 (68) P. 43–54 (in Russian).
35. El’kina G.Ya. Cobalt in the soil–plant system on podzolic soils of the European North-East of Russia // *Agrochemistry*. 2021. No. 7. P. 75–82. doi: 10.31857/S000218812107005X
36. Sheujen A.H., Akanova N.I., Bondareva T.N. Agrochemistry. P. 6. Ecological agrochemistry. Maykop: OOO “Poligraf-YuG”, 2018. 575 p. (in Russian).
37. Utkin A.A., Akanova N.I., Noda I.B. Dynamics of the content and distribution of trace elements in sod-podzolic soils and plants of agrocenoses // *Agrochimia*. 2023. No. 8. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188123080100
38. El’kina G.Ya. Effect of copper level in soil on nitrogen metabolism and amino acid synthesis in plants // *Agrochemistry*. 2018. No. 12. P. 88–96 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188118120050
39. Adamczyk-Szabela D., Wolf W.M. The influence of copper and zinc on photosynthesis and phenolic levels in basil (*Ocimum basilicum* L.), borage (*Borago officinalis* L.), common nettle (*Urtica dioica* L.) and peppermint (*Mentha piperita* L.) // *Int. J. Mol. Sci.* 2024. V. 25. Article No. 3612. doi: 10.3390/ijms25073612
40. Stankevica K., Klavins M., Rutina L. Accumulation of metals in sapropel // *Mater. Sci. Appl. Chem.* 2012. V. 26. P. 99–105.
41. Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A. Features of Pb, Sb, Cd accumulation in sediments of small lakes in the south of the Republic of Karelia // *Transactions of KarRC RAS*. 2020. No. 4. P. 75–94 (in Russian). doi: 10.17076/lim1198

Бактерии-деструкторы с ростстимулирующими свойствами для использования в экологической биотехнологии

© 2024. Т. Ю. Коршунова, д. б. н., в. н. с., Е. В. Кузина, к. б. н., с. н. с.,
С. Р. Мухаматдырова, к. б. н., с. н. с., Ю. Ю. Шарипова, м. н. с.,
М. Г. Искужина, к. б. н., н. с.,

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук,
450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, д. 69,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

Актуальным направлением исследований в области экологической биотехнологии является поиск и изучение микроорганизмов-деструкторов, устойчивых к присутствию поллютантов, а также способных к стимуляции роста растений-ремедиантов. Из образцов почвы выделены 4 штамма углеводородокисляющих микроорганизмов, которые идентифицированы на основании их культурально-морфологических, физиолого-биохимических свойств и сравнительного анализа гена, кодирующего 16S рРНК. С помощью метода газовой хроматографии установлено, что бактерии *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, *A. courvalinii* UOM 35 способны в значительной степени к биодеструкции нефти (4% объём.) в жидкой среде при 24 и 8 °С (93,0–95,9 и 78,4–81,1% соответственно). Для штамма *Rhodococcus erythropolis* UOM 33 при тех же условиях эти показатели составляли 44,8 и 33,7% соответственно. Все микроорганизмы росли в присутствии ароматических углеводородов (в том числе полициклических), обладали устойчивостью к NaCl (5–7%) и ионам свинца (1,00–1,25 г/л), а также были способны к азотфиксации, растворению неорганического фосфата, синтезу индолил-3-уксусной кислоты (150–1416 нг/мл культуральной жидкости) и продукции липазы. Показано, что штаммы *A. calcoaceticus* UOM 22 и *A. courvalinii* UOM 35 увеличивали всхожесть семян ячменя на 8,6 и 10,5%, а *A. calcoaceticus* UOM 29 и *A. courvalinii* UOM 35 стимулировали рост корней этого растения на 16,3 и 18,1% соответственно. Результаты экспериментов свидетельствуют о возможности использования штаммов *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, а также *A. courvalinii* UOM 35 для очистки нефтезагрязнённых почв, в том числе в комплексе с растениями-ремедиантами.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, бактерии-нефтедеструкторы, хлорид натрия, тяжёлые металлы, стимуляция роста растений, ячмень.

Bacteria-destructors with growth-stimulating properties for use in ecological biotechnology

© 2024. T. Yu. Korshunova ^{ORCID: 0000-0002-6186-0827*}
E. V. Kuzina ^{ORCID: 0000-0002-6905-0108*} S. R. Mukhamatdyarova ^{ORCID: 0000-0001-7641-7943*}
Yu. Yu. Sharipova ^{ORCID: 0000-0002-1794-5137*} M. G. Iskuzhina ^{ORCID: 0000-0003-0196-9596*}
Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences (UIB UFRC RAS),
69, Oktyabrya prospect, Ufa, Russia, 450054,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

A topical research trend in ecological biotechnology is the search and study of microorganisms-destructor resistant to additional pollutants and growth-stimulating to remediating plants. Four strains of hydrocarbon-oxidizing microorganisms isolated from soil samples were identified on the basis of cultural-morphological, physiological-biochemical properties and a comparative analysis of the gene encoding 16S rRNA. The bacteria *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22 and UOM 29, *A. courvalinii* UOM 35 showed a significant degree of oil biodegradation in a liquid medium at 24 and 8 °C (93.0–95.6% and 78.4–81.1%, respectively). In the same conditions these indicators were 44.8 and 33.7%, respectively for strain *Rhodococcus erythropolis* UOM 33. All microorganisms grew in the presence of aromatic hydrocarbons (including polycyclic hydrocarbons), were resistant to NaCl (5–7%) and lead ions (1.00–1.25 g/L). They were capable of nitrogen fixation and inorganic phosphate dissolution, indole-3-acetic acid synthesis (150–1416 ng/ml of culture liquid) and hydrolytic enzyme lipase production. We found that *A. calcoaceticus* UOM 22 and *A. courvalinii* UOM 35 strains increased the barley seeds germination by 8.6 and 10.5%, as well as *A. calcoaceticus* UOM 29 and *A. courvalinii* UOM 35

stimulated the barley root growth by 16.3 and 18.1% respectively. The results of the experiments indicate the possibility of using *A. calcoaceticus* UOM 22 and UOM 29, and *A. courvalinii* UOM 35 strains for cleaning oil-contaminated soils, including in combination with remediant-plants.

Keywords: oil pollution, oil degrading bacteria, sodium chloride, heavy metals, plant growth stimulation, barley.

В настоящее время и в долгосрочной перспективе углеводороды есть и будут оставаться основным источником энергии на планете. Из-за несовершенства или нарушения технологии, а также изношенности оборудования их извлечение, транспортировка и переработка приводят к широкомасштабным отрицательным последствиям для окружающей среды (ОС) [1, 2]. К их числу, помимо механического нарушения почвенного покрова и собственно нефтяного загрязнения, относится техногенное засоление почвы, вызванное попаданием в неё высокоминерализованных нефтепромысловых вод. Другими поллютантами, связанными с нефтеразливами, являются тяжёлые металлы (ТМ). Поступление дополнительных загрязнителей усугубляет неблагоприятное воздействие углеводородов на растения и почвенный биоценоз, ещё более тормозя процесс естественного самовосстановления почвы и существенно осложняя её очистку [3, 4].

Биоремедиация, основанная на способности живых объектов (бактерий и грибов) к разложению загрязнителей, считается наиболее безопасным и относительно недорогим методом ликвидации последствий нефтяного загрязнения [5, 6]. При этом современной тенденцией развития экологической биотехнологии является применение микроорганизмов (МО), которые не только разрушают ксенобиотики, но и обладают способностью к усилению роста растений-ремедиантов, что приводит к ускорению процессов очистки и восстановления почвы [2, 7].

Целью работы было выделение и идентификация штаммов бактерий-нефтедеструкторов, устойчивых к действию повышенных концентраций хлорида натрия и ТМ и изучение их способности к стимуляции роста растений ячменя.

Объекты и методы исследования

Выделение штаммов МО в чистую культуру производили из почвенных образцов с территории Республики Башкортостан методом накопительных культур [8]. Для этого 2 г почвы помещали в колбы со 100 мл жидкой минеральной среды Раймонда [9] с нефтью (1% объём.) и инкубировали 7 сут при 28 °С

и 160 об./мин на шейкере-инкубаторе ES-20/60 («Biosan», Латвия). Далее изоляты высеивали на мясо-пептонный агар (МПА) [10] и культивировали при 28 °С в течение 5 сут.

Для дальнейших исследований отбирали изоляты, наиболее активно растущие на твёрдой и жидкой среде Раймонда с нефтью в качестве единственного источника углерода. Интенсивность роста в жидкой среде (нефть 4% объём.) оценивали по изменению состояния среды и сдвигу pH, а также по численности МО на 3 и 6 сут культивирования, которую определяли методом Коха [8]. Проводили высев из разведений культуральной жидкости на твёрдую среду Раймонда, на поверхность которой наносили 100 мкл стерильной нефти, через 5 сут подсчитывали количество сформировавшихся колоний. Культурально-морфологические свойства бактерий определяли при выращивании на МПА, физиолого-биохимические – по общепринятым методикам [10]. Первичную идентификацию проводили согласно определителю Берджи [11]. Видовую принадлежность МО устанавливали с помощью секвенирования фрагмента последовательности гена 16S рРНК. Тотальную ДНК выделяли по методике, описанной в [12]. Амплификацию фрагмента гена 16S рРНК осуществляли с универсальными праймерами 27F и 1492R [13] на амплификаторе C1000 Touch™ Thermal Cycler («Bio-Rad Laboratories», США). Очистку ПЦР-продуктов и последующую секвенирующую реакцию выполняли с применением набора реактивов Big Dye Terminator Cycle Sequencing Kit («Applied Biosystems», США) по инструкции производителя на автоматическом секвенаторе ABI PRISM 3730 («Applied Biosystems», США). Для поиска нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК, гомологичных соответствующим последовательностям исследуемых штаммов, использовали сервер EzBioCloud (<http://www.ezbiocloud.net/eztaxon>).

Углеводородокисляющую активность штаммов при комнатной и низкой положительной температуре оценивали по степени деструкции алифатической фракции нефти с помощью метода газовой хроматографии [14]. Бактерии культивировали в жидкой среде Раймонда с нефтью (4% объём.) при 24 и 8 °С

в течении 5 и 10 сут соответственно. В качестве эталона использовали штамм-нефтедеструктор *A. calcoaceticus* ИБ ДТ-5.1/1 [15].

Субстратную специфичность штаммов в отношении ароматических углеводородов определяли визуально (рост по штриху) без подсчёта численности МО при культивировании на твёрдой среде Раймонда при 28 °С в течении 7 сут. В качестве источника углерода использовали жидкие бензол, толуол, ксилол, фенол и в виде кристаллов нафталин, фенантрен и бифенил. Соединения добавляли на крышку чашки Петри (жидкие – по 100 мкл, сухие – по несколько кристаллов), чашку переворачивали дном вверх и обматывали парафиновой лентой для предотвращения улечуивания [16].

Устойчивость штаммов к хлориду натрия и ТМ (Zn, Co, Cd, Pb, Cu, Ni) оценивали визуально (рост по штриху) без подсчёта численности МО на МПА с NaCl или солями этих металлов ($ZnSO_4 \cdot 6H_2O$, $CoCl_2 \cdot 2H_2O$, $Cd(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$) после инкубации в течение 7 сут при 28 °С. Концентрацию NaCl варьировали в пределах 3–7%, ионов металлов 0,25–1,50 г/л.

Продукцию штаммами гидролитических ферментов устанавливали следующими методами: протеазы – по разжижению желатины, амилазы – по диаметру зоны гидролиза крахмала, липазы – по наличию непрозрачной зоны кальциевых солей жирных кислот на среде с Твин 80 [8]. Целлюлозолитическую активность определяли по появлению зоны растворения карбоксиметилцеллюлозы [17].

Способность штаммов к азотфиксации выявляли по показателям роста по штриху без подсчёта численности МО на агаризованной среде Эшби [8], а к растворению неорганических фосфатов – на твёрдой среде Пиковской со свежесажённым ортофосфатом кальция [18] по наличию зон просветления вокруг колоний бактерий.

Содержание индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) в культуральной жидкости анализировали хроматографически в системе ВЭЖХ LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором SPD-M20A («Shimadzu», Япония) так, как это было описано в [19].

Наличие у штаммов способности к стимуляции роста растений проверяли на семенах ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Челябинский 99, которые замачивали 15 мин в жидкой культуре бактерий, разбавленной до титра 10^4 КОЕ/мл. Численность МО в культуральной

жидкости для обработки семян определяли методом Коха. Проводили высев разведений трёхсуточной жидкой культуры бактерий на МПА и через 3 сут подсчитывали количество сформировавшихся на плотной среде колоний. Готовую жидкую культуру бактерий в период, предшествующий замачиванию семян, хранили в холодильнике. Непосредственно перед замачиванием семян разбавляли жидкую культуру бактерий до титра 10^4 КОЕ/мл. Контрольные семена обрабатывали водопроводной водой. Семена помещали по 20 шт. во влажные камеры и инкубировали при 24–26 °С в течение 3 сут, после чего определяли количество проросших семян (%), длину побегов и суммарную длину корней.

Эксперименты выполняли в трёхкратной повторности. Статистическую обработку проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010. В таблице 3 данные представлены как среднее \pm стандартная ошибка. Достоверность различий оценивали по t-критерию Стьюдента ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Из 24 визуально различающихся при выращивании на МПА изолятов для дальнейших исследований были отобраны два, обозначенные как UOM 29 и UOM 35, которые характеризовались наиболее интенсивным ростом на агаризованной и жидкой среде Раймонда с нефтью. Ранее авторами при тех же условиях были выделены изоляты UOM 22 и UOM 33.2 (в данном исследовании обозначен как UOM 33), у которых было проведено предварительное изучение способности к разложению нефти и устойчивости к присутствию в среде ТМ или NaCl [20]. В настоящей работе они были идентифицированы, а их свойства рассмотрены более подробно. Источники выделения, описание внешнего вида колоний, культурально-морфологические и физиолого-биохимические свойства изолятов приведены в таблице 1.

При росте каждого изолята в жидкой среде с нефтью наблюдалось помутнение среды, диспергирование нефти, образование хлопьев и сдвиг pH в кислую сторону с 6,54 (начало инкубации) до 5,13–5,28 на шестые сут. На третьи и шестые сут культивирования численность изолятов UOM 29, UOM 33 и UOM 35 находилась в пределах $1-2 \cdot 10^6$ КОЕ/мл, а UOM 22 – $3-4 \cdot 10^8$ КОЕ/мл. Указанные результаты свидетельствуют об активном разложении нефти микроорганизмами.

Источники выделения и таксономические признаки изолятов
Isolation sources and taxonomic features of isolates

Признаки и свойства Features and properties	Изолят / Isolate			
	UOM 22	UOM 29	UOM 33	UOM 35
Источник выделения Isolation source	г. Уфа, урбанозем*	Баймакский район, пос. Тубинский	г. Уфа, урбанозем*	Гафурийский район, берег р. Усолка
Морфология колоний при росте на МПА Morphology of colonies during growth on MPA	Круглые, диаметр 6 мм, молочного цвета с ровным краем и гладкой поверхностью*	Круглые, диаметр 4 мм, кремового цвета с ровным краем и гладкой поверхностью	Круглые, выпуклые, диаметр 1 мм, тёмно-кремового цвета с волнистым краем и гладкой поверхностью плотной консистенции*	Круглые, диаметр 5 мм, кремового цвета с ровным краем и гладкой блестящей поверхностью
Морфология клеток Cell morphology	Грамотрицательные палочки, диаметром 0,8–1,5 и длиной 1,5–2,0 мкм	Грамотрицательные палочки, диаметром 0,6–1,5 и длиной 1,6–2,2 мкм	Грамположительные, на ранней стадии клетки палочковидные или кокковидные	Грамотрицательные палочки, диаметром 0,9–1,6 и длиной 1,5–2,5 мкм
Физиолого-биохимические свойства Physiological and biochemical properties	Аэробные, неспорообразующие бактерии. Оксидазоотрицательные, каталазоположительные. Крахмал, карбоксиметилцеллюлозу не гидролизуют			
	Не разжижают желатин. Растут при 4 и 37 °С. Используют цитрат, малонат, D-глюкозу, сахарозу, глутарат, L-гистидин, L-тирозин, β-аланин, L-орнитин, L-аргинин, этанол, глицерин	Не разжижают желатин. Растут при 4 и 37 °С. Используют цитрат, малонат, D-глюкозу, сахарозу, глутарат, L-гистидин, L-аспартат, L-тирозин, β-аланин, L-орнитин, L-аргинин, L-лейцин, γ-аминобутират	Не разжижают желатин. Растут при 4 и 41 °С. Используют мальтозу, D-фруктозу, сахарозу, бензойную кислоту, L-аспарагин, инозитол, маннитол, сорбитол	Разжижают желатин. Растут при 4 и 41 °С. Используют лактат, малонат, аминобутират, фенилацетат, бензоат, цитрат, глутамат, глутарат, L-гистидин, L-аргинин, L-лейцин, L-фенилаланин
Типовой штамм, % сходства, номер доступа GenBank Type strain, % similarity, GenBank accession number	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> DSM 30006T, 100%, OP686570	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> DSM 30006T, 99,94%, OP686572	<i>Rhodococcus erythropolis</i> NBRC 15567T, 99,91%, OP686571	<i>Acinetobacter courvalinii</i> ANC 3623T, 99,22%, OP686573

Примечание: * – данные по [20] / Note: * – data from [20].

Таблица 2 / Table 2

Свойства штаммов / Strain properties

Свойства / Properties		Штамм / Strain			
		<i>A. calcoaceticus</i> UOM 22	<i>A. calcoaceticus</i> UOM 29	<i>R. erythropolis</i> UOM 33	<i>A. courvalinii</i> UOM 35
Степень биодеструкции нефти, % Degree of oil biodegradation, %	24 °C	93,0*	95,6	44,8*	95,9
	8 °C	78,4	81,1	33,7	79,2
Максимальная концентрация NaCl, % Maximum concentration of NaCl, %		5*	5	7*	6
Максимальная концентрация ТМ, г/л Maximum concentration of heavy metals, g/L	Pb ²⁺	1,00*	1,25	1,25*	1,25
	Zn ²⁺	0,25*	0,25	0,25*	0,25
	Cd ²⁺	<0,25*	<0,25	0,25*	<0,25
	Co ²⁺	<0,25*	<0,25	0,50*	0,25
	Cu ²⁺	<0,25*	0,25	0,25*	<0,25
	Ni ²⁺	<0,25*	<0,25	0,25*	0,25
Продукция ИУК, нг/мл Indole-3-acetic acid production, ng/mL		1416	521	150	658

В результате сравнительного анализа максимальное сходство нуклеотидных последовательностей гена, кодирующего 16S рРНК, изолятов UOM 22 и UOM 29 наблюдалось со штаммом *Acinetobacter calcoaceticus* DSM 30006T, UOM 33 – с *Rhodococcus erythropolis* NBRC 15567T, UOM 35 – с *A. courvalinii* ANC 3623T. Полученные нуклеотидные последовательности депонированы в GenBank (табл. 1).

Несомненно, самым важным качеством углеводородокисляющих бактерий является их способность к деградации нефти, особенно при пониженных температурах, что позволяет удлинить рекультивационный сезон в регионах с холодным климатом. Штаммы *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, *A. courvalinii* UOM 35 продемонстрировали значительную и приблизительно одинаковую (между собой) степень биодеструкции нефти при комнатной (93,0–95,9%) и низкой положительной температуре (78,4–81,1%) (табл. 2).

В первом случае она даже превосходила таковую у эталонного штамма-нефтедеструктора *A. calcoaceticus* ИБ ДТ-5.1/1 (73,3% при 24 °C и 83,2% – при 8 °C). Самая низкая степень биодеструкции наблюдалась в вариантах с *R. erythropolis* UOM 33 (44,8 и 33,7% при 24 и 8 °C соответственно).

Установлен активный рост штаммов *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, *R. erythropolis* UOM 33 в присутствии бензола, фенола, ксилола, нафталина, бифенила и фенантрена. При этом ни один из четырёх изучаемых МО не использовал толуол как источник углерода и энергии, что, вероятно, связано с высокой токсичностью последнего для этих бактерий.

При извлечении углеводородного сырья загрязнение почвы нефтью часто сопровождается разливами нефтепромысловых вод, содержащих большое количество солей, значительная доля которых приходится на хлориды [21]. Одновременное присутствие нескольких поллютантов ингибирует жизнедеятельность автохтонной углеводородокисляющей микробиоты и приводит к снижению эффективности самоочищения такой почвы. Поэтому для её биорекультивации следует использовать микроорганизмы-нефтедеструкторы, способные переносить повышенные концентрации солей. Выделенные в данной работе штаммы оказались устойчивыми к присутствию в среде NaCl в количестве 5–7% (табл. 2), что позволяет говорить о перспективах их использования для очистки нефтезагрязнённых почв, подвергшихся засолению.

Тяжёлые металлы считаются одними из наиболее широко распространённых загрязнителей ОС [22]. Среди прочего, они вызывают изменения в составе и строении клеточных структур и влияют на биосинтетические процессы у МО, а также значительно снижают биоразнообразие и биомассу микробных сообществ [23]. Поэтому подбор штаммов, устойчивых к воздействию этих веществ и их соединений, является важным подготовительным этапом при проведении биоремедиации. В настоящем исследовании бактерии демонстрировали отсутствие роста (или очень слабый рост) при наличии в среде ионов кадмия, цинка, никеля, меди и кобальта в количестве более 0,25 г/л, за исключением *R. erythropolis* UOM 33, который выдерживал присутствие

Co²⁺ в количестве 0,50 г/л [20]. Микроорганизмы проявили устойчивость к свинцу в концентрации 1,00 (все штаммы) и 1,25 г/л (кроме *A. calcoaceticus* UOM 22) (табл. 2), несмотря на то что, согласно ГОСТ 17.4.1.02-83, он (как цинк и кадмий), относится к первому классу токсичности (вещества высокоопасные).

Выделение МО гидролитических ферментов, катализирующих процессы расщепления различных классов соединений, является ценным с биотехнологической точки зрения свойством. Штамм *R. erythropolis* UOM 33 не продуцировал ферменты из тестируемого набора, штамм *A. courvalinii* UOM 35 образовывал липазу и протеазу, остальные изученные бактерии – липазу. Наличие способности к синтезу последней повышает перспективы использования штаммов *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, а также *A. courvalinii* UOM 35 в качестве биодеструкторов, так как известно, что липазная активность МО используется для мониторинга биодegradации нефти и нефтепродуктов в ходе очистки [24], а сам фермент может служить эффективным средством для разложения углеводов [25, 26].

Азот и фосфор являются ключевыми по значимости и количественной потребности элементами в минеральном питании растений. Первый входит в состав аминокислот, из которых синтезируются белки, и играет важную роль практически во всех метаболических процессах в растительных клетках. Вторым влияет на формирование зачатков репродуктивных частей растений и ветвление корней. При этом содержащийся в почве фосфор практически недоступен растениям из-за плохой растворимости и образования комплексов с металлами. Поэтому штаммы, обладающие азотфиксирующей и фосфатмобилизирующей активностью, представляют большой практический интерес для экологической и сельскохозяйственной биотехнологии. Все выделенные МО

активно росли на среде Эшби без азота, что свидетельствует об их олигонитрофильности и растворяли неорганический фосфат (за исключением *R. erythropolis* UOM 33).

Как известно, продукция бактериями фитогормонов играет важную роль в их рост-стимулирующем влиянии на растения [27]. Ауксины являются основными регуляторами роста и развития растений, а ИУК – наиболее распространённым индольным соединением этой группы. Количество этого вещества в культуральной жидкости изучаемых МО значительно различалось (табл. 2). Самый высокий уровень накопления ИУК зафиксирован у штамма *A. calcoaceticus* UOM 22 (1416 нг/мл культуральной жидкости), а самый низкий – у *R. erythropolis* UOM 33 (150 нг/мл).

Обработка семян ячменя штаммами *A. calcoaceticus* UOM 22 и *A. courvalinii* UOM 35 приводила к достоверному повышению их всхожести на 8,6 и 10,5% (табл. 3).

Инокуляция не оказала значимого эффекта на длину побегов у проростков, но способствовала увеличению этого показателя у корней на 16,3 и 18,1% в случае использования *A. calcoaceticus* UOM 29 и *A. courvalinii* UOM 35 соответственно. Скорее всего, это объясняется действием ИУК, которая, в числе прочего, активизирует рост подземной части растений [27]. Причём, оба вышеупомянутых МО синтезируют её в среднем количестве (521 и 658 нг/мл соответственно), в то время как штаммы *R. erythropolis* UOM 33 и *A. calcoaceticus* UOM 22, характеризующиеся минимальным и максимальным уровнем продукции данного вещества, не усиливали рост корней. Вероятно, причина отсутствия ускорения корнеобразования при бактериализации в первом случае связана с недостаточностью образования ИУК, а во втором – с его избыточностью, так как высокие концентрации этого ауксина стимулируют образование этилена,

Таблица 3 / Table 3

Влияние бактериализации на всхожесть и ростовые параметры растений ячменя
Effect of bacterization on germination and growth parameters of barley plants

Штаммы / Strains	Всхожесть, % Germination, %	Длина, мм / Length, mm	
		корень (суммарно) root (total)	побег / shoot
Контроль / Control	87,3±3,9	121±6	15,5±0,6
<i>A. calcoaceticus</i> UOM 22	94,8±3,2*	129±7	15,0±0,9
<i>A. calcoaceticus</i> UOM 29	91±4	140±8*	15,8±0,8
<i>R. erythropolis</i> UOM 33	86,7±2,9	121±5	15,1±0,7
<i>A. courvalinii</i> UOM 35	96,5±3,5*	142±8*	16,1±0,7

Примечание: * – различия с контролем достоверны при $p < 0,05$.
Note: * – differences with control are significant at $p < 0,05$.

который подавляет рост растений [28]. Такое свойство бактерий как увеличение всхожести и ростовых характеристик растений (особенно их подземной части) очень важно при биоремедиации почвы, загрязнённой нефтью и ТМ, с помощью микробно-растительных ассоциаций. Развитая корневая система помогает растениям преодолеть дефицит воды и питательных элементов, который возникает при нефтяном загрязнении. Она способствует увеличению потока растительных экссудатов в ризосферу, что повышает в ней численность бактерий, в том числе углеводородокисляющих. Кроме того, высокая плотность МО в прикорневой зоне приводит к иммобилизации ТМ путём усиления их бактериального связывания в хелатные комплексы [29, 30].

Заключение

Из образцов почвы выделены и идентифицированы штаммы микроорганизмов *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, *R. erythropolis* UOM 33, *A. courvalinii* UOM 35, которые проявляют значительную степень биодеструкции нефти при 24 и 8 °С (44,8–95,9 и 33,7–81,1% соответственно) и способны к использованию ароматических углеводородов (в том числе полициклических) в качестве источника углерода. Помимо этого, бактерии обладают набором других биотехнологически значимых свойств, таких как азотфиксация, фосфатмобилизация, устойчивость к NaCl (5–7%) и ионам свинца (1,00–1,25 г/л), продукция ИУК (150–1416 нг/мл культуральной жидкости) и липазы. Показано, что штаммы *A. calcoaceticus* UOM 22 и *A. courvalinii* UOM 35 повышают всхожесть семян ячменя, а *A. calcoaceticus* UOM 29 и *A. courvalinii* UOM 35 стимулируют рост корневой системы этого растения.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения штаммов *A. calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, а также *A. courvalinii* UOM 35 для ликвидации последствий углеводородного загрязнения, в том числе совместно с растениями-ремедиантами.

Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной академии наук № 23-24-00130, <https://rscf.ru/project/23-24-00130/>.

References

1. Fowzia A., Fakhruddin A.N.M. A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its

biodegradation // Int. J. Environ. Sci. Nat. Res. 2018. V. 11. No. 3. P. 63–69. doi: 10.19080/IJESNR.2018.11.555811

2. Korshunova T. Yu., Chetverikov S. P., Bakaeva M. D., Kuzina E. V., Rafikova G. F., Chetverikova D. V., Loginov O. N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2019. V. 55. No. 4. P. 344–354. doi: 10.1134/S0003683819040094

3. Gao Y., Wang J., Guo S., Hu Y.-L., Li T., Mao R., Zeng D.-H. Effects of salinization and crude oil contamination on soil bacterial community structure in the Yellow River Delta region, China // Appl. Soil Ecol. 2015. V. 86. P. 165–173. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.10.011

4. Camacho-Montealegre C. M., Rodrigues E. M., Morais D. K., Tótola M. R. Prokaryotic community diversity during bioremediation of crude oil contaminated oilfield soil: effects of hydrocarbon concentration and salinity // Braz. J. Microbiol. 2021. V. 52. No. 2. P. 787–800. doi: 10.1007/s42770-021-00476-5

5. Turkovskaya O., Muratova A. Plant-bacterial degradation of polyaromatic hydrocarbons in the rhizosphere // Trends Biotechnol. 2019. V. 37. No. 9. P. 926–930. doi: 10.1016/j.tibtech.2019.04.010

6. Hoang S. A., Lamb D., Seshadri B., Sarkar B., Chopala G., Kirkham M. B., Bolan N. S. Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils // J. Hazard Mater. 2021. V. 401. Article No. 123282. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123282

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 anthropogenic 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. Microbiology workshop / Ed. A. I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 602 p. (in Russian).

9. Raymond R. L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Develop. Industr. Microbiol. 1961. V. 2. No. 1. P. 23–32.

10. Manual of methods for general bacteriology / Eds. P. Gerhardt, R. G. E. Murray, R. N. Costilow, E. W. Nester, W. A. Wood, N. R. Krieg, G. B. Phillips. Washington, DC: American Society of Microbiology, 1981. 524 p.

11. Holt J. G., Krieg N. R., Sneath P. H. A., Staley J. T., Williams S. T. Bergey's manual of determinative bacteriology. Lippincott Williams & Wilkins, 1994. 787 p.

12. Current protocols in molecular biology / Eds. F. M. Ausubel, R. Brent, R. E. Kingston, D. D. Moore, J. G. Seidman, J. A. Smith, K. Struhl. John Wiley & Sons, Inc., 2003. P. 241–245.

13. Lane D. J. 16S/23S rRNA sequencing // Nucleic acid techniques in bacterial systematic / Eds. E. Stackebrandt, M. Goodfellow. John Wiley and Sons, Ltd., 1991. P. 115–175.

14. Borzenkov I. A., Milekhina E. I., Gotoeva M. T., Rozanova E. P., Belyaev S. S. The properties of hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from the oilfields of Tatarstan,

- Western Siberia, and Vietnam // *Microbiology*. 2006. V. 75. No. 1. P. 66–72.
15. Mukhamatdyarova S.R., Korshunova T.Yu., Loginov O.N. Oxidation of oil and oil hydrocarbons by bacteria *Acinetobacter* sp. strain IB DT-5.1/1 // *Izvestiya UNTS RAN*. 2013. No. 3. P. 16–18 (in Russian).
16. Rybkina D.O., Gusev V.A., Plotnikova E.G. Soil microorganisms degrading wide spectrum of technogenous compounds // *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*. 2005. No. 6. P. 115–122 (in Russian).
17. Zubov D.V., Tolchenov A.A. Rapid method for control activity of enzyme complex // *Vestnik SGTU*. 2012. No. 1 (64). P. 389–392 (in Russian).
18. Pikovskaya R.I. Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species // *Mikrobiologiya*. 1948. V. 17. P. 362–370 (in Russian).
19. Starikov S.N., Chetverikov S.P. Strain *Enterobacter* sp. UOM-3 is able to synchronous destruction of halogen-containing herbicides and synthesis of indol-3-acetic acid // *Ecobiotech*. 2020. V. 3. No. 4. P. 716–721 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2020-3-4-716-721
20. Korshunova T.Yu., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Sharipova Yu.Yu. Screening for hydrocarbon-oxidizing microorganisms resistant to heavy metals and sodium chloride // *Izvestiya UNTS RAN*. 2022. No. 3. P. 23–30 (in Russian). doi: 10.31040/2222-8349-2022-0-3-23-30
21. Gabbasova I.M., Suleymanov R.R., Garipov T.T. Degradation and remediation of soils polluted with oil-field wastewater // *Eurasian Soil Sci*. 2013. V. 46. No. 2. P. 204–211. doi: 10.1134/S1064229313020051
22. Vareda J.P., Valente A.J., Dur es L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review // *J. Environ. Manage*. 2019. V. 246. P. 101–118. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.126
23. Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as a factor of microorganisms metabolism changes (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 2. P. 5–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018
24. Margesin R., Hämmerle M., Tschërko D. Microbial activity and community composition during bioremediation of diesel-oil-contaminated soil: effects of hydrocarbon concentration, fertilizers, and incubation time // *Microb. Ecol*. 2007. V. 53. No. 2. P. 259–269. doi: 10.1007/s00248-006-9136-7
25. Kadri T., Magdouli S., Rouissi T., Brar S.K. *Ex-situ* biodegradation of petroleum hydrocarbons using *Alcanivorax borkumensis* enzymes // *Biochem. Eng. J*. 2018. V. 132. P. 279–287. doi: 10.1016/j.bej.2018.01.014
26. Bamitale O.M., Ayomikun A.M. Biodegradation potential of tropical hydrocarbon degrading *Providencia stuartii* // *Trends Appl. Sci. Res*. 2020. V. 15. No. 3. P. 253–259. doi: 10.3923/tasr.2020.253.259
27. Kudoyarova G., Arkhipova T., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses // *Front. Plant Sci*. 2019. V. 10. Article No. 1368. doi: 10.3389/fpls.2019.01368
28. Glick B.R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world // *Microbiol. Res*. 2014. V. 169. No. 1. P. 30–39. doi: 10.1016/j.micres.2013.09.009
29. Agnello A.C., Bagard M., van Hullebusch E.D., Esposito G., Huguenot D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation // *Sci. Total Environ*. 2016. V. 563–564. P. 693–703. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061
30. Pishchik V.N., Vorob'ev N.I., Provorov N.A., Khomyakov Yu.V. Mechanisms of plant and microbial adaptation to heavy metals in plant–microbial systems // *Microbiology*. 2016. V. 85. No. 3. P. 257–271. doi: 10.1134/S0026261716030097

Исследование закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе их утилизации

© 2024. Е. В. Гаевая¹, к. б. н., доцент,

Л. В. Рудакова², д. т. н., профессор, зав. кафедрой,

¹Тюменский индустриальный университет,

625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38,

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

e-mail: gaevajaev@tyuiu.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

Буровой шлам в естественном состоянии обладает вязко-пластичными свойствами, в сухом состоянии отличается слитностью и твердостью. Это обусловлено содержанием ионов натрия в поглощающем комплексе. Особенности физико-механических свойств бурового шлама указывают на способность его к поглощению и удерживанию растворенных солей. При внесении гипса в буровой шлам в разных процентных соотношениях от объема отхода происходит изменение концентрации хлорид-иона во всех образцах, при этом наблюдается хлоридно-сульфатное засоление. Содержание сульфат-иона возрастает при минимальной объемной доле внесения гипса. Внесение гипса в объемной доле 15 и 20% влияет на снижение содержания фосфат- и карбонат-ионов. Изменение электропроводности свидетельствует об увеличении концентрации водорастворимых солей в водной вытяжке, что подтверждает прямая высокая корреляционная связь. При внесении гипса от 7–20% объемных долей происходит существенное снижение плотного остатка. Использование гипса увеличивает фильтрационную способность бурового шлама. Применение гипса позволяет облегчить гранулометрический состав бурового шлама за счёт активной коагуляции коллоидов. В результате выноса водорастворимых солей создаются оптимальные водно-физические свойства буровых шламов, происходит структурирование и повышение фильтрационных свойств бурового шлама. Математическая модель прогноза растворения солей в буровом шламе позволяет учитывать неуправляемые факторы (плотность, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации, содержание водорастворимых солей).

Ключевые слова: буровой шлам, солевой состав, коэффициент скорости растворения.

Study of patterns of changes in salt composition drill cuttings in the process of their disposal

© 2024. E. V. Gaevaya¹ ORCID: 0000-0002-0631-9149¹

L. V. Rudakova² ORCID: 0000-0003-3292-8359²

¹Tyumen Industrial University,

38, Volodarsky St., Tyumen, Russia, 625000,

²Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolskiy Pr., Perm, Russia, 614990,

e-mail: gaevajaev@tyuiu.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

Drill cuttings in their natural state have viscous-plastic properties; in a dry state they are cohesive and hard. This is due to the content of sodium ions in the absorbing complex. Features of the physical and mechanical properties of drill cuttings indicate its ability to absorb and retain dissolved salts. When gypsum is added to drill cuttings in different percentages of the waste volume, the concentration of chloride ion changes in all samples, and chloride-sulfate salinization is observed. The content of sulfate ion increases with a minimum volume fraction of gypsum application. The addition of gypsum in a volume fraction of 15 and 20% affects the reduction of phosphate and carbonate ions. A change in electrical conductivity indicates an increase in the concentration of water-soluble salts in the water extract, which is confirmed by a direct high correlation. When adding gypsum from 7–20% volume fractions, a significant reduction in the dense residue occurs. The use of gypsum increases the filtration capacity of drill cuttings. The use of gypsum makes it possible to lighten the granulometric composition of drill cuttings due to the active coagulation of colloids. As a result of the removal of water-soluble salts, optimal water-physical properties of drill cuttings are created, structuring and filtration properties of drill cuttings are increased. A mathematical model for predicting the dissolution of salts in drill cuttings allows taking into account uncontrollable factors (density, particle size distribution, filtration coefficient, content of water-soluble salts).

Keywords: drill cuttings, salt composition, dissolution rate coefficient.

Утилизация буровых отходов в основном связана с внесением смеси различных компонентов или природных материалов, позволяющих снижать их токсический эффект за счёт протекающих физико-химических реакций [1–3].

Применение разных типов буровых растворов при бурении скважин, в состав которых входят такие компоненты, как едкий калий, кальцинированная сода, хлорид кальция, хлорид калия, известь и т. д., оказывает токсическое действие на компоненты природной среды. Щёлочность буровых шламов связана с высоким содержанием водорастворимых солей и является причиной негативного воздействия на почвенный покров и растительность [4–6].

Токсичность буровых отходов обусловлена высоким содержанием солей (хлориды, фосфаты, карбонаты, сульфаты), некоторые из них вызывают щёлочность и высокую гидрофильность шлама. Исследования авторов по снижению водорастворимых солей в буровых шламах с применением различных мелиорантов-коагулянтов отражены в работах [7–9]. Наиболее важным показателем направленности снижения токсичности буровых шламов является изменение солевого состава. Применение коагулянтов ($Al_2(SO_4)_3$, $CaCl_2$, $CaCO_3$) свидетельствует о возможности изменения водно-физических и химических свойств бурового шлама [10–14].

Водорастворимые соли в буровых шламах находятся в разных состояниях в зависимости от их количества и свойств, влажности и структуры порового пространства бурового шлама. Часть солей находится в растворе, где они диссоциируют на ионы с различной степенью подвижности. Часть ионов адсорбирована твёрдой фазой бурового шлама.

Движение солей в буровом шламе может осуществляться при поступлении влаги в шлам, её передвижении и расходе, изменении её физического состояния. Осложняется этот процесс электрокинетическим явлением, вызванным диффузионным процессом из-за разности концентрации раствора, влиянием осмотического явления, термодиффузионным процессом из-за разности температур, процессом растворения и кристаллизации солей.

Снижение токсических свойств буровых шламов возможно осуществлять за счёт изменения химического (солевого) состава путём внесения химических реагентов, например, гипса, фосфогипса и др. Этот процесс производится путём смешения в определённых пропорциях реагентов и буровых шламов [15].

Целью исследований является выявление закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе ионно-обменной реакции при использовании гипса, а также разработка математической модели растворения солей.

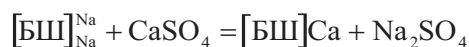
Объекты и методы исследования

Буровой шлам в естественном состоянии обладает вязко-пластичными свойствами, в сухом состоянии отличается слитностью и твёрдостью. Это обусловлено содержанием соединений натрия в поглощающем комплексе. Буровой шлам обладает высокой щёлочностью, рН составляет 8,5–11,0. С целью улучшения физико-химических свойств бурового шлама необходимо вытеснить поглощённые ионы натрия кальцием с применением гипса в качестве коагулянта.

Буровой шлам имеет градацию массы от текучей до тугопластичной, от чёрного до светло-серого цвета, в зависимости от глубины забоя с включениями различного диаметра, по характеристике грунтов относится к типу от суглинка лёгкого до глины тяжёлой. В рамках исследований был изучен буровой шлам на солевом буровом растворе на водной основе (БШ_{сво}), буровой шлам на полимер-глинистом буровом растворе на водной основе (БШ_{гр}), буровой шлам на ингибированном полимер-глинистом буровом растворе на водной основе (БШ_{ингр}), буровой шлам на буровом растворе на углеводородной основе (БШ_{руо}).

Буровой шлам – измельчённая выбуренная горная порода, содержащая остатки бурового раствора, буровых сточных вод и флюидов из пластов скважин. Буровой шлам представлял собой мелкодисперсную глинистую массу, влажность которой на момент исследования составляла 32%, истинная плотность – 2,1 г/см³.

Для снижения токсичности бурового шлама использовали гипс – белое либо сероватое порошкообразное вещество тонкого помола, полученное путём переработки природного минерала из класса сульфатов методом обжига при повышенных температурах. Химическая формула: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (гидрат сульфата кальция). При внесении коагулянта катионы Na^+ , придающие буровому шламу состояние золя, замещаются на катионы Ca^{2+} , способствующие снижению содержания плотного остатка в водной вытяжке:



В результате ионно-обменной реакции происходит увеличение содержания сульфатов, что обусловлено продуктами обменных реакций (Na_2SO_4).

Внесение гипса в буровой шлам осуществляли в следующем соотношении (в %): буровой шлам + гипс (97:3); буровой шлам + гипс (95:5); буровой шлам + гипс (93:7); буровой шлам + гипс (90:10); буровой шлам + гипс (85:15); буровой шлам + гипс (80:20). Далее буровой шлам и гипс перемешивали до однородной массы.

Плотный остаток водной вытяжки, водородный показатель и удельную электрическую проводимость определяли в соответствии с ГОСТ 26423-85, коэффициент фильтрации – по ГОСТ 25584-2016. Гранулометрический состав определён на лазерном анализаторе частиц «Analysette 22» MicroTecPlus. Концентрации водорастворимых солей определяли в соответствии с ГОСТ 26424-85 и ПНД Ф 16.1:2.3:2.2.69-10.

Результаты и обсуждение

Особенности физико-механических свойств (влажность, плотность, поровое пространство) бурового шлама указывают на способность к поглощению и удерживанию растворённых солей. С помощью силы молекулярного притяжения частицы способны притягивать и удерживать молекулы различных веществ на поверхности. Насыщенность бурового шлама мельчайшими частицами (коллоидными) влияет на его способность поглощать вещества из раствора. Такая связь основана на силе молекулярного притяжения (адсорбции). Одноимённость электрических зарядов коллоидных частиц препятствует соединению друг с другом в более крупные агрегаты.

Ёмкость поглощения бурового шлама возрастает с увеличением коллоидов, поглощённые катионы удерживаются на поверхности коллоидных частиц и могут быть вытеснены обратно другими катионами. Вследствие этого поглощение ионов является обменом катионов на поверхности мельчайших частиц бурового шлама. Поглощающий комплекс бурового шлама благодаря адсорбционной способности отрицательно заряженных коллоидных частиц насыщен катионами. Качественный состав поглощённых катионов зависит от химических реагентов, входящих в буровой раствор [16–19].

Высокая щёлочность ухудшает водно-физические свойства буровых шламов и усиливает пептизацию коллоидов. Результаты

исследований внесения гипса в различных объёмных долях в буровой шлам, образованный на разных типах буровых растворов, представлены на рисунках 1 и 2.

При внесении гипса в буровой шлам в разных процентных соотношениях от объёма отхода (3–20%) происходит изменение концентрации хлорид-иона во всех образцах, при этом выявляется хлоридно-сульфатное засоление. Содержание сульфат-иона возрастает до 3 раз при минимальной объёмной доле внесения гипса. Минимальные значения карбонат-ионов наблюдали при внесении гипса в объёмных долях 15 и 20%. Внесение гипса в объёмной доле 20% влияло на снижение содержания фосфат-ионов в 2 раза (рис. 3).

Плотный остаток водной вытяжки даёт представление об общем содержании растворимых в воде органических и минеральных соединений (табл. 1).

При внесении гипса от 7 до 20% происходит существенное снижение плотного остатка, при этом наблюдается высокая обратная корреляционная связь $r = -0,70$. На основании полученных результатов анализа плотного остатка водной вытяжки образцы мелиорированных буровых шламов по степени засоленности грунтов относились к незасоленным (содержание легкорастворимых солей $< 0,5\%$) и слабозасоленным (0,5–1,0%).

Одной из важнейших характеристик почв и грунтов является водопроницаемость, то есть способность впитывать и фильтровать воду. Численной характеристикой водопроницаемости является коэффициент фильтрации. Фильтрационная способность почв и грунтов различного гранулометрического состава отличается. Наибольший коэффициент фильтрации наблюдается у грунтов с большим размером частиц, и, наоборот, – чем меньше частицы грунта, тем хуже осуществляется фильтрация воды. Супесь и суглинок обладают промежуточными значениями фильтрационной способности в зависимости от того, какие размеры частиц преобладают в их составе [20–22].

Коэффициенты фильтрации в буровом шламе приближены к нулю, т. е. фильтрация отсутствовала, отход относился к водонепроницаемым грунтам (табл. 2).

Внесение гипса в буровой шлам увеличивает фильтрационную способность. Наилучший результат наблюдали при 10–20% объёмной доли в буровых шламах на солевом буровом растворе, ингибированном полимер-глинистом буровом растворе и на отдельно взятом полимер-глинистом буровом растворе.

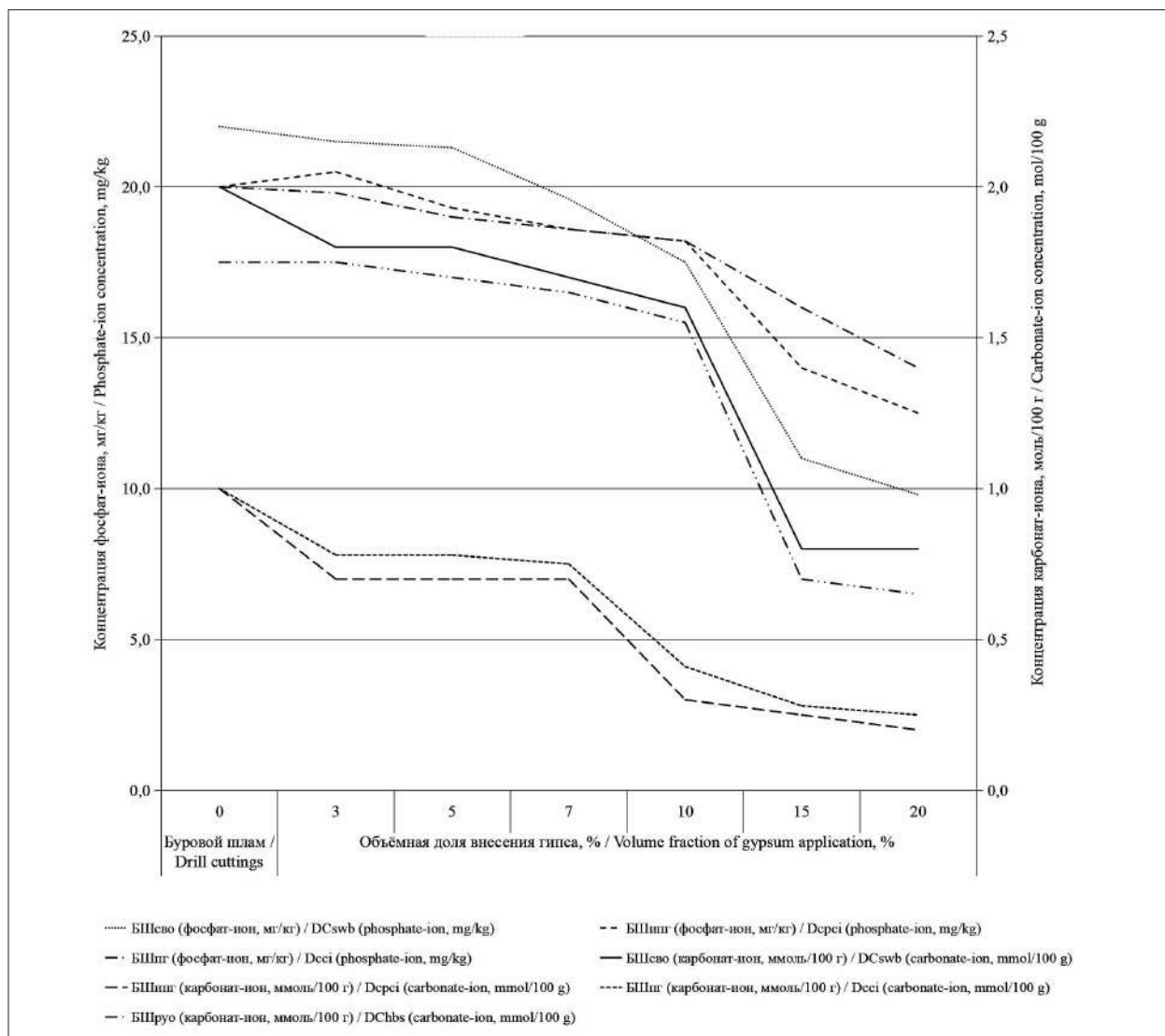


Рис. 1. Изменение концентрации фосфат-ионов и карбонат-ионов в буровом шлам при внесении гипса
 Fig. 1. Change in the concentration of phosphate ions and carbonate ions in drill cuttings when adding gypsum

Таблица 1 / Table 1

Величина плотного остатка в водной вытяжке бурового шлама и мелиорированных буровых шламов
 The amount of dense residue in the aqueous extract of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Величина плотного остатка водной вытяжки, % The amount of dense residue of the aqueous extract, %			
	БШ _{сво} / DC _{swb}	БШ _{пг} / DC _{pci}	БШ _{пг} / DC _{ci}	БШ _{рво} / DC _{hbs}
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	2,48±0,17	1,08±0,08	1,99±0,14	2,23±0,16
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	1,01±0,07	0,44±0,03	0,81±0,06	0,90±0,06
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,92±0,09	0,40±0,03	0,74±0,05	0,83±0,06
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,86±0,09	0,37±0,03	0,69±0,05	0,77±0,05
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,73±0,07	0,32±0,02	0,58±0,04	0,65±0,05
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,68±0,07	0,30±0,02	0,54±0,04	0,61±0,04
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,53±0,05	0,23±0,02	0,43±0,03	0,48±0,03

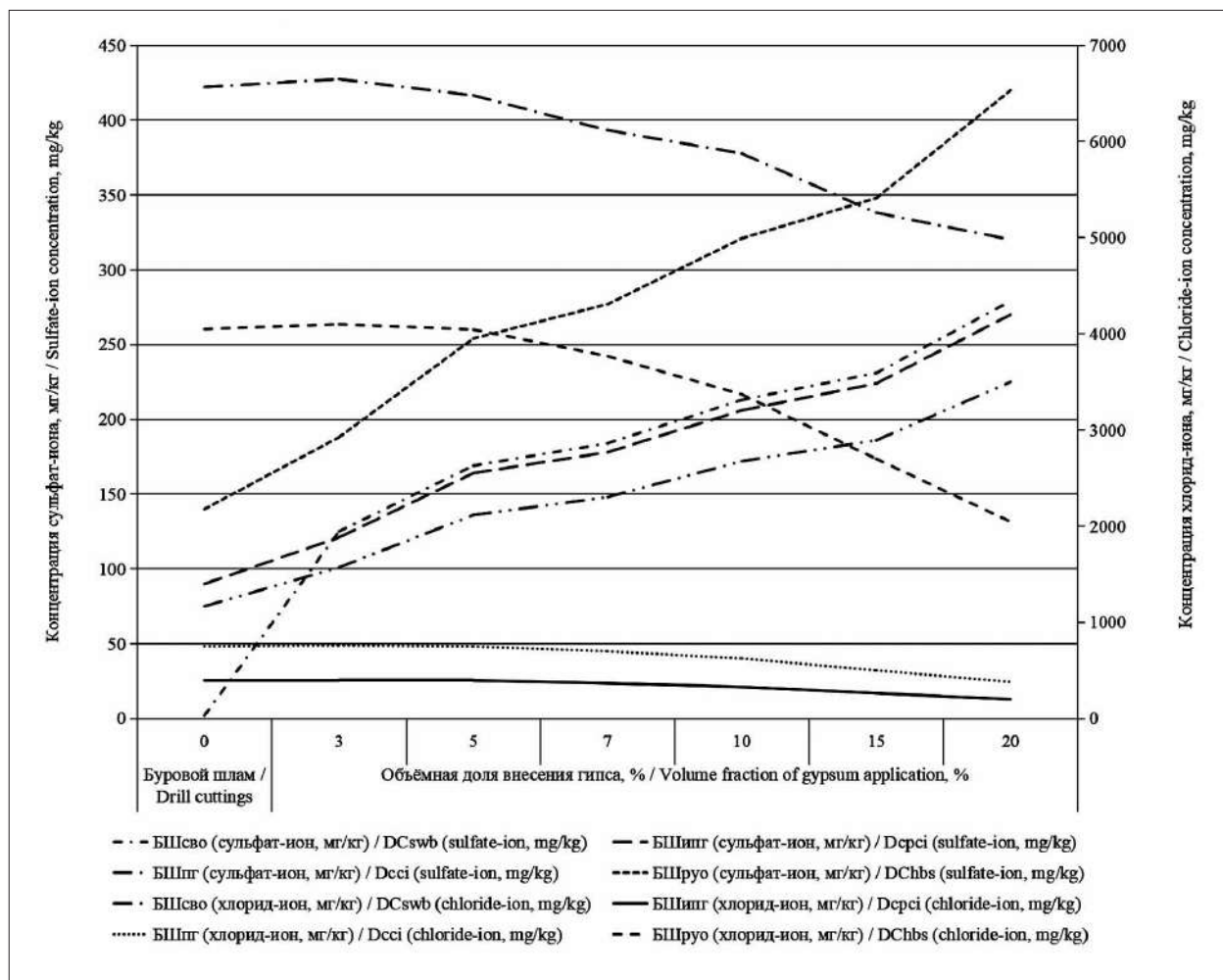


Рис. 2. Изменение концентрации сульфат-ионов и хлорид-ионов в буровом шлам при внесении гипса
 Fig. 2. Changes in the concentration of sulfate ions and chloride ions in drill cuttings when adding gypsum

Таблица 2 / Table 2

Значения коэффициента фильтрации в буровом шлам и мелиорированных буровых шлам
 Values of filtration coefficient in drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % / Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Коэффициент фильтрации, м/сут Filtration coefficient, m/day			
	БШ _{сво} DC _{swb}	БШ _{пг} DC _{pci}	БШ _{пруо} DC _{ci}	БШ _{пруо} DC _{lbs}
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	0,0001	0,0002	0,0005	0,0004
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	0,00236	0,00328	0,00250	0,00187
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,00354	0,00427	0,00390	0,00190
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,00495	0,00555	0,00470	0,00271
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,00636	0,00698	0,00624	0,00330
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,00728	0,00788	0,00715	0,00411
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,00787	0,00859	0,00739	0,00587

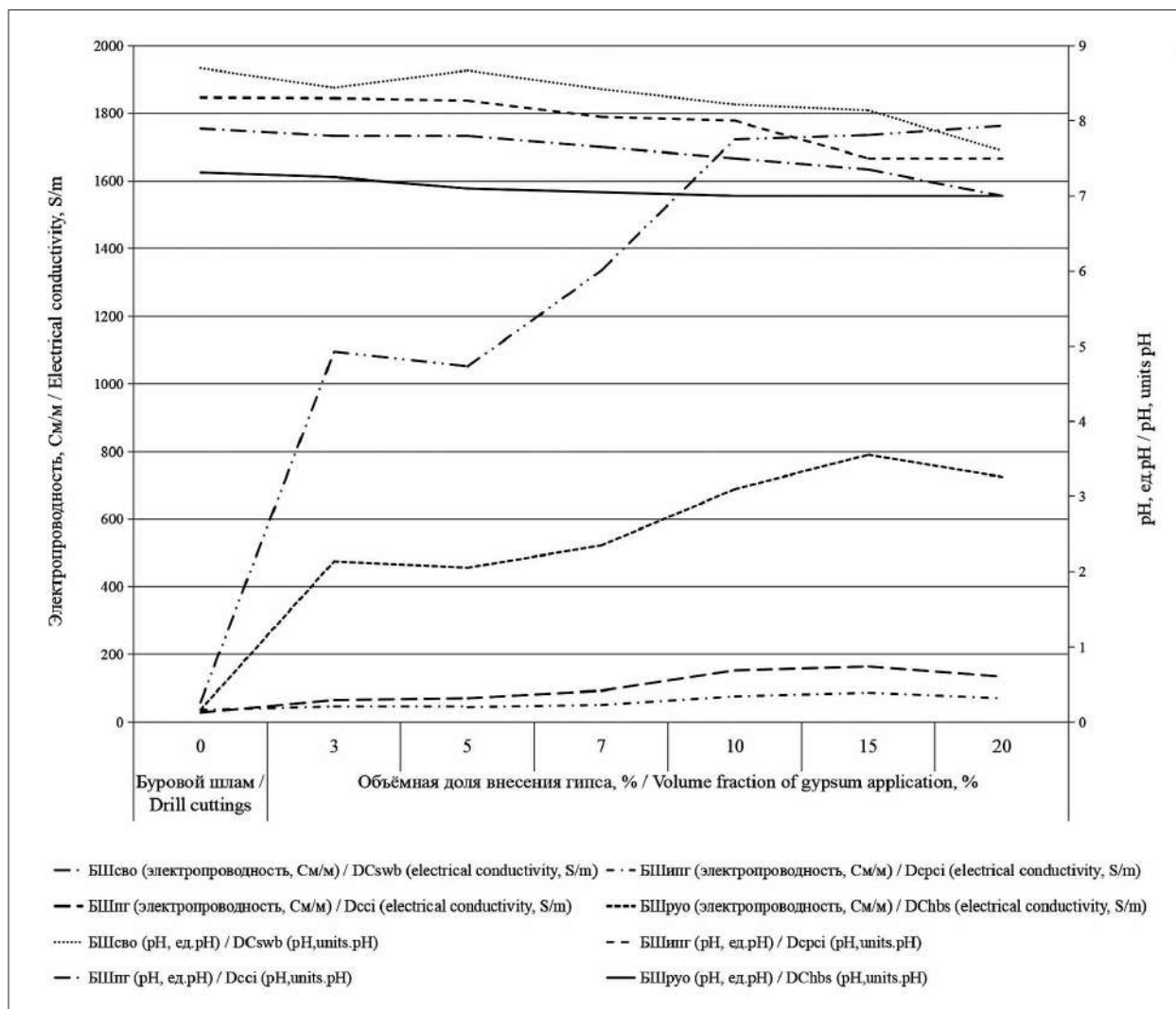


Рис. 3. Изменение электропроводности и водородного показателя в буровом шлеме при внесении гипса
 Fig. 3. Changes in electrical conductivity and pH in drill cuttings when adding gypsum

Изменения коэффициента фильтрации буровых шламов на углеводородной основе наблюдались при внесении 20% объемной доли гипса. Мелиорированный буровой шлам с коэффициентом фильтрации более 0,005 м/сут относился к слабопроницаемым грунтам.

Использование гипса увеличивает фильтрационную способность бурового шлама. В первоначальный период действия гипса происходит активное снижение содержания ионов натрия в поглощающем комплексе и насыщение его ионами кальция. При внесении гипса происходит существенное снижение величины плотного остатка, при этом происходит оструктурирование и улучшение фильтрационных свойств бурового шлама.

Илистая фракция представляет собой высокодисперсные частицы и является одной из причин негативных процессов в буровых шламах. Применение гипса позволяет увели-

чить содержание физического песка за счёт активной коагуляции коллоидов [23]. В буровых шламах содержание фракций физической глины составляет БШ_{сво} – 36,44%, БШ_{пг} – 38,15%, БШ_{пг} – 35,41%, что позволяет их отнести к суглинку среднему. В буровом шлеме на углеводородной основе частиц диаметром < 0,01 мм было 97,06%, шлам относился к глине тяжелой. В буровом шлеме содержание илистой фракции обусловлено выбуренной породой и используемым буровым раствором (табл. 3).

При внесении гипса в буровой шлам в объемной доле от 10 до 20% наблюдается переход градации гранулометрического состава из суглинка среднего до суглинка легкого в пробах бурового шлама (БШ_{сво}, БШ_{пг}, БШ_{пг}). Внесение гипса в объемной доле 15–20% способствовало максимальному снижению содержания илистой фракции

Таблица 3 / Table 3

Гранулометрический состав бурового шлама и мелиорированных буровых шламов
Granulometric composition of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	БШ _{сво} / DC _{swb}		БШ _{нгр} / DC _{pci}		БШ _{нр} / DC _{ci}		БШ _{пыо} / DC _{hbs}	
	Диаметр частиц, мм / Particle diameter, mm							
	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01	> 0,01	< 0,01
Буровой шлам (контроль) Drill cuttings (control)	63,56	36,44	61,85	38,15	64,59	35,41	2,94	97,06
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	66,60	33,40	64,81	35,19	64,75	35,25	5,59	94,41
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	68,87	31,13	65,30	34,70	64,90	35,10	8,19	91,81
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	69,95	30,05	68,14	31,86	67,60	32,40	9,09	90,91
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	70,24	29,76	71,70	28,30	70,55	29,45	11,09	88,91
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	72,35	27,65	73,94	26,06	71,85	28,15	21,79	78,21
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	72,97	27,03	75,44	24,56	72,39	27,61	23,89	76,11

Таблица 4 / Table 4

Значения коэффициента скорости растворения хлорид-ионов бурового шлама и мелиорированных буровых шламов / Values of the coefficient of dissolution rate of chloride ions of drill cuttings and reclaimed drill cuttings

Объёмная доля внесения гипса в буровой шлам, % Volume fraction of gypsum added to drill cuttings, %	Коэффициент скорости растворения, γ_2 1/сут Dissolution rate coefficient, γ_2 1/day.			
	БШ _{сво} / DC _{swb}	БШ _{нгр} / DC _{pci}	БШ _{нр} / DC _{ci}	БШ _{пыо} / DC _{hbs}
Буровой шлам + гипс (97:3) Drill cuttings + gypsum (97:3)	0,000065	0,001998	0,001667	0,000018
Буровой шлам + гипс (95:5) Drill cuttings + gypsum (95:5)	0,000474	0,003035	0,003224	0,000465
Буровой шлам + гипс (93:7) Drill cuttings + gypsum (93:7)	0,003391	0,003860	0,004518	0,001881
Буровой шлам + гипс (90:10) Drill cuttings + gypsum (90:10)	0,006711	0,011710	0,010467	0,005534
Буровой шлам + гипс (85:15) Drill cuttings + gypsum (85:15)	0,014498	0,026280	0,023843	0,013703
Буровой шлам + гипс (80:20) Drill cuttings + gypsum (80:20)	0,019028	0,042492	0,036556	0,029038

в буровом шламе на углеводородной основе до глины средней.

Важность прогнозирования нормы внесения гипса позволяет учитывать уровень снижения содержания водорастворимых солей в буровом шламе [24, 25].

В качестве начального условия принимается естественное распределение гипса по всей толще бурового шлама, концентрация хлорид-ионов выражается зависимостями вида:

$$c(x, t) = c_0(x), b_i(x, t) = b_{i0}(x), (i = 1, 2).$$

Функция $c(x, t)$ – концентрация водорастворимых солей в момент времени t (сут.) в точке x (м) в толще бурового шлама при внесении гипса в объёмной доле b_i .

В качестве фильтрующей воды использовали дистиллированную воду, в связи с тем, что концентрация хлорид-ионов не обнаружена, данный показатель в формуле не учитывался.

Коэффициент фильтрации $v(t)$ м/сут. – известная функция, высота слоя $x = 0,1$ м; $b_* = b_0, b_3, b_5 \dots b_{20}$ (норма внесения гипса $b_0 = 0\%$, $b_3 = 3\%$, $b_5 = 5\%$, $b_7 = 7\%$, $b_{10} = 10\%$, $b_{15} = 15\%$,

$b_{20} = 20\%$); $c_0(x, b_0)$, $c_3(x, b_3)$, $c_5(x, b_5)$, $c_7(x, b_7)$, $c_{10}(x, b_{10})$, $c_{15}(x, b_{15})$, $c_{20}(x, b_{20})$ – концентрация хлорид-ионов до и после внесения гипса, мг/кг. Коэффициент скорости растворения хлорид-ионов (γ_2 , 1/сут.) рассчитывается по формуле:

$$\gamma_2(v) = \sqrt{\frac{b_{0..20}}{b_*}} \cdot \left(\frac{c_0 - c_{3..20}}{c_0} \right) / \frac{dv}{dx}$$

Результаты расчётов коэффициента скорости растворения хлорид-ионов показывают зависимость полученных значений от объёмной доли внесения гипса (табл. 4). Внесение гипса способствовало увеличению скорости растворения, но необходимо учитывать, что на скорость растворения влияют исходные физические и химические характеристики бурового шлама (плотность, гранулометрический состав, содержание солей).

Заключение

Содержание водорастворимых солей в буровых шламах зависит от типа применяемого раствора, повышенные их концентрации оказывают негативное воздействие на почвенный покров, поверхностные и грунтовые воды. В процессе утилизации буровых шламов необходимо снижать токсический эффект водорастворимых солей путём внесения гипса.

В ходе экспериментальных исследований выявлены закономерности снижения содержания водорастворимых солей в буровых шламах с применением гипса. Изменение электропроводности подтверждает переход солей в растворимую форму и зависит от объёма внесения гипса. При внесении гипса происходит существенное снижение величины плотного остатка, при этом происходит структурирование и повышение фильтрационных свойств бурового шлама. Математическая модель прогноза растворения солей в буровом шламе позволяет учитывать неуправляемые факторы (плотность, гранулометрический состав, коэффициент фильтрации, содержание водорастворимых солей) и доказывает положительное влияние внесения гипса.

Одним из направлений применения утилизированных буровых шламов являются общестроительные земляные работы: планировочные работы, обратные засыпки (котлованов, карьерных выемок грунта, полостей рекультивируемых шламовых амбаров и временных шламонакопителей кустовых площадок), в том числе на этапах технической рекультивации и подготовки к ним.

Литература

1. Gaevaya E., Tarasova S., Bytsko A. The environmental impact of drilling sludge and ways of their utilization // *Journal of Ecological Engineering*. 2019. V. 20. No. 7. P. 26–30. doi: 10.12911/22998993/109764
2. Король В.В. Утилизация отходов бурения скважин // *Экология и промышленность России*. 2005. № 1. С. 40–42.
3. Малахова Ю.В., Осташ О.С., Мазлова Е.А. Экологические проблемы, связанные с содержанием государственных скважин на лицензионном участке недропользователя // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 8. С. 66–71. doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-66-71
4. Чеботаев А.Н. Возможность утилизации бурового шлама Бованенковского месторождения в производстве строительных материалов // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2015. № 9. С. 26–29.
5. Плешакова Е.В., Беляков А.Ю. Использование различных приёмов биотестирования для оценки токсического действия на почву инвертно-эмульсионных буровых растворов и их дисперсионных сред // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2014. № 1. С. 38–43.
6. Гаева Е.В., Тарасова С.С., Солонина В.А. Разработка научных основ утилизации буровых отходов при бурении скважин в нефтяной отрасли. Тюмень: ТИУ, 2020. 160 с.
7. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Митрофанов Н.Г. Возможности улучшения свойств бурового шлама для их рекультивации // *Вестник КрасГАУ*. 2012. № 1 (64). С. 28–31.
8. Скипин Л.Н., Храмцов Н.В., Гузеева С.А., Петухова В.С. Возможности рекультивации буровых шламов и солонцов с использованием фосфогипса // *Аграрный вестник Урала*. 2013. № 6 (112). С. 71–73.
9. Заличева И.Н., Волков И.В., Ганина В.С., Шустова Н.К. Зависимость экологической опасности буровых растворов от солёности акватории нефтедобычи // *Нефтегазовые технологии*. 2001. № 3. С. 35–38.
10. Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Петухова В.С., Кустышева И.Н. Эффективность влияния коагулянтов на физические свойства буровых шламов // *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2015. № 4–3 (64). С. 88–92.
11. Скипин Л.Н., Петухова В.С., Третьяков П.Ю., Скипин Д.Л. Подбор мелиорантов для рекультивации буровых шламов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2023. № 4 (313). С. 13–19. doi: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-13-19
12. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Симакова Т.В. Результативность действия мелиорантов на буровых шламах // *Аграрный вестник Урала*. 2016. № 6 (148). С. 45–50.
13. Ибраева В.А., Сафаров А.Х. Биотехнологические методы обезвреживания буровых отходов //

Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии: материалы XI Всероссийской научной интернет-конференции. Уфа: УГНТУ, 2017. С. 106–108.

14. Скипин Л.Н., Скипин Д.Л., Петухова В.С., Бурлаенко В.З. Влияние коагулянтов и омагниченной воды для рассоления буровых шламов // Естественные и технические науки. 2022. № 6 (169). С. 72–77.

15. Тарасова С.С., Гаевая Е.В. Влияние содержания водорастворимых солей в буровых шламах на смертность гидробионтов (*Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer) // Естественные и технические науки. 2021. № 7 (158). С. 81–84.

16. Ковалева Е.И., Гучок М.В., Ледовских С.С., Демин В.В. Аспекты вовлечения отходов бурения в процессы почвообразования // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 20–25. doi: 10.18412/1816-0395-2019-08-20-25

17. Рудакова Л.В., Пичугин Е.А., Зильберман М.В., Зырянова Е.В. Влияние кислотного стабилизатора грунтов на кислотно-основные свойства буровых шламов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 10. С. 29–33. doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-29-33

18. Ягафарова Г.Г., Барахнина В.Б. Утилизация экологически опасных буровых отходов // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 48–61.

19. Сакаева Э.Х., Рудакова Л.В. Оценка биологической активности техногрунтов на основе буровых шламов для рекультивации нарушенных земель // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 192–197. doi: 10.25750/1995-4304-2020-4-192-197

20. Белявская О.Ш., Зимнухов М.А., Плотникова А.Е. Влияние коагулянтов на фильтрационную способность буровых шламов // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 9-ой международной научно-технической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. С. 217–218.

21. Плотникова А.Е., Зимнухов М.А., Белявская О.Ш. Влияние магнитного поля на растворы солей в составе сточных вод буровых шламов севера Тюменской области // Вестник молодежной науки. 2019. № 2 (19). С. 17.

22. Плотникова А.Е., Зимнухов М.А., Белявская О.Ш. Определение коэффициента фильтрации бурового шлама с высокой концентрацией солей // Балтийский морской форум: материалы VII Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. Калининград: Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», 2019. Т. 1. С. 344–349.

23. Петухова В.С., Скипин Л.Н., Митрофанов Н.Г. Подбор коагулянтов для улучшения свойств буровых шламов // Ползуновский вестник. 2011. № 4–2. С. 180–181.

24. Микайылов Ф.Д. Прямые и обратные задачи модели солепереноса в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов // Пермский аграрный вестник. 2014. № 3 (7). С. 52–59.

25. Микайылов Ф.Д. Определение параметров модели солепереноса при промывках водонасыщенных поверхностно-засоленных почвогрунтов // Почвоведение. 2007. № 5. С. 599–609.

References

1. Gaevaya E., Tarasova S., Bytsko A. The environmental impact of drilling sludge and ways of their utilization // Journal of Ecological Engineering. 2019. V. 20. No. 7. P. 26–30. doi: 10.12911/22998993/109764

2. Korol V.V. Disposal of well drilling waste // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2005. No. 1. P. 40–42 (in Russian).

3. Malakhova Yu.V., Ostakh O.S., Mazlova E.A. Environmental problems associated with the maintenance of government wells in the subsoil user's licensed area // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2021. V. 25. No. 8. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-8-66-71

4. Chebotaev A.N. Possibility of recycling drill cuttings from the Bovankovskoye field in the production of building materials // Stroitelstvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. 2015. No. 9. P. 26–29 (in Russian).

5. Pleshakova E.V., Belyakov A.Yu. The use of various biotesting techniques to assess the toxic effect of invert emulsion drilling fluids and their dispersion media on soil // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie. 2014. No. 1. P. 38–43 (in Russian).

6. Gaevaya E.V., Tarasova S.S., Solonina V.A. Development of the scientific basis for the disposal of drilling waste when drilling wells in the oil industry. Tyumen: TIU, 2020. 160 p. (in Russian).

7. Petukhova V.S., Skipin L.N., Mitrofanov N.G. Possibilities for improving the properties of drill cuttings for their reclamation // Vestnik KrasGAU. 2012. No. 1 (64). P. 28–31 (in Russian).

8. Skipin L.N., Khramtsov N.V., Guzeeva S.A., Petukhova V.S. Possibilities for reclamation of drill cuttings and solonchaks using phosphogypsum // Agrarnyy vestnik Urala. 2013. No. 6 (112). P. 71–73 (in Russian).

9. Zalicheva I.N., Volkov I.V., Ganina V.S., Shustova N.K. Dependence of the environmental hazard of drilling fluids on the salinity of the oil production area // Neftegazovye tekhnologii. 2001. No. 3. P. 35–38 (in Russian).

10. Skipin L.N., Skipin D.L., Petukhova V.S., Kustysheva I.N. The effectiveness of the influence of coagulants on the physical properties of drill cuttings // Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. No. 4-3 (64). P. 88–92 (in Russian).

11. Skipin L.N., Petukhova V.S., Tretyakov P.Yu., Skipin D.L. Selection of ameliorants for drill cuttings rec-

lamation // Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. 2023. No. 4 (313). P. 13–19 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2023-4(313)-13-19

12. Petukhova V.S., Skipin L.N., Skipin D.L., Simakova T.V. Effectiveness of ameliorants on drill cuttings // Agrarnyy vestnik Urala. 2016. No. 6 (148). P. 45–50 (in Russian).

13. Ibraeva V.A., Safarov A.Kh. Biotechnological methods for neutralizing drilling waste // Integratsiya nauki i vysshego obrazovaniya v oblasti bio- i organicheskoy khimii i biotekhnologii: materialy XI Vserossiyskoy nauchnoy internet-konferencii. Ufa: UGNTU, 2017. P. 106–108 (in Russian).

14. Skipin L.N., Skipin D.L., Petukhova V.S., Burlaenko V.Z. The influence of coagulants and magnetized water for desalinization of drill cuttings // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2022. No. 6 (169). P. 72–77 (in Russian).

15. Tarasova S.S., Gaeva E.V. The influence of the content of water-soluble salts in drill cuttings on the mortality of aquatic organisms (*Daphnia magna* Straus and *Chlorella vulgaris* Beijer) // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2021. No. 7 (158). P. 81–84 (in Russian).

16. Kovaleva E.I., Guchok M.V., Ledovskikh S.S., Demin V.V. Aspects of the involvement of drilling waste in soil formation processes // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2019. V. 23. No. 8. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-08-20-25

17. Rudakova L.V., Pichugin E.A., Zilberman M.V., Zyryanova E.V. The influence of an acid soil stabilizer on the acid-base properties of drill cuttings // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2019. V. 23. No. 10. P. 29–33 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-10-29-33

18. Yagafarova G.G., Barakhnina V.B. Disposal of environmentally hazardous drilling waste // Neftegazovoe delo. 2006. No. 2. P. 48–61 (in Russian).

19. Sakaeva E.Kh., Rudakova L.V. Assessment of the biological activity of technosoils based on drill cuttings for the reclamation of disturbed lands // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 192–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-192-197

20. Belyavskaya O.Sh., Zimnukhov M.A., Plotnikova A.E. The influence of coagulants on the filtration capacity of drill cuttings // Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy 9-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2019. P. 217–218 (in Russian).

21. Plotnikova A.E., Zimnukhov M.A., Belyavskaya O.Sh. The influence of the magnetic field on salt solutions in the composition of wastewater from drill cuttings in the north of the Tyumen region // Vestnik molodezhnoy nauki. 2019. No. 2 (19). P. 17 (in Russian).

22. Plotnikova A.E., Zimnukhov M.A., Belyavskaya O.Sh. Determination of the filtration coefficient of drill cuttings with high salt concentrations // Baltiyskiy morskoy forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma. V 6-ti tomakh. Kaliningrad: Baltiyskaya gosudarstvennaya akademiya rybopromyslovogo flota FGBOU VPO “Kaliningradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet”, 2019. V. 1. P. 344–349 (in Russian).

23. Petukhova V.S., Skipin L.N., Mitrofanov N.G. Selection of coagulants to improve the properties of drill cuttings // Polzunovskiy vestnik. 2011. No. 4-2. P. 180–181 (in Russian).

24. Mikayylov F.D. Direct and inverse problems of the salt transfer model under conditions of stationary water-salt regime of soils // Permskiy agrarnyy vestnik. 2014. No. 3 (7). P. 52–59 (in Russian).

25. Mikayylov F.D. Determination of salt transfer model parameters during leaching of water-saturated surface-saline soils // Pochvovedenie. 2007. No. 5. P. 599–609 (in Russian).

Получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов для промышленного производства высокоэффективного биосурфактанта

© 2024. М. Н. Барамзин, аспирант, м. н. с.,
С. Г. Литвинец, к. с.-х. н., проректор,
Е. А. Мартинсон, к. т. н., директор института,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr22995@vyatsu.ru

Рамнолипиды – перспективные гликолипидные биосурфактанты микробного происхождения, которые можно использовать в качестве препаратов для биоремедиации почв в случаях загрязнения нефтепродуктами. Экспрессия кластера генов биосинтеза рамнолипидов у основного продуцента – *Pseudomonas aeruginosa* – регулируется сигналами кворум-сенсинга (QS). Сложная регуляция биосинтеза не позволяет добиться высокого выхода продукта. Получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов является перспективным путём по преодолению сложной QS-зависимой регуляции биосинтеза рамнолипидов, а также позволяет избежать применения условно-патогенной *Pseudomonas aeruginosa* для промышленного получения рамнолипидов. На основе плазмидного вектора pAl2-T с конструкцией из нативного промотора и генами rhlAB были получены гетерологичные продуценты на основе *Escherichia coli* BLWT с продуктивностью трансформанта E14 $3,40 \pm 0,96$ г/л; и на основе *Pseudomonas viridiflava* AIC1223 – с продуктивностью трансформантов P5, P6, P8 $332,00 \pm 0,10$, $200,00 \pm 0,10$ и $180,00 \pm 0,10$ г/л, соответственно. Наличие в экспрессирующем векторе генов rhlAB позволяет получить монорамнолипиды, пригодные для дальнейшего использования в качестве агента солиubilизации гидрофобных загрязняющих веществ, таких как нефтепродукты, в почвах, что позволит интенсифицировать процессы биоремедиации.

Ключевые слова: рамнолипиды, гетерологичная экспрессия, псевдомонады, биосурфактанты, нефтедеструкторы, гликолипиды.

Obtaining heterological rhamnolipid producers for industrial production of highly-effective biosurfactant

© 2024. М. Н. Baramzin ORCID: 0009-0001-2138-2445¹
S. G. Litvinets ORCID: 0000-0001-8583-5274² E. A. Martinson ORCID: 0000-0002-0364-4106³
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr22995@vyatsu.ru

Rhamnolipids are promising microbial glycolipid biosurfactants that can be used as preparations for soil bioremediation in oil pollution. The expression of the rhamnolipid biosynthesis gene cluster in the main producer, *Pseudomonas aeruginosa*, is regulated by quorum sensing signals (QS). Complex biosynthesis regulation does not allow achieving high product yields. The production of heterologous rhamnolipid producers is a promising way to overcome the complex QS-dependent regulation of rhamnolipid biosynthesis, and also avoids the use of opportunistic *Pseudomonas aeruginosa* for the industrial production of rhamnolipids. Heterologous *Escherichia coli* BLWT-based producers with a transformant E14 productivity of 3.40 ± 0.96 g/L were obtained on the basis of the plasmid vector pAl2-T with a construct from the native promoter and rhlAB genes, and *Pseudomonas viridiflava* AIC1223-based ones with the productivity of transformants P5, P6, P8 332.00 ± 0.10 , 200.00 ± 0.10 and 180.00 ± 0.10 g/L, respectively. The presence of rhlAB genes in the expression vector allows the obtaining monorhamnolipids for further use as an agent for the solubilization of soil hydrophobic pollutant (e. g. petroleum products), which will intensify bioremediation processes.

Keywords: rhamnolipids, heterologous expression, pseudomonads, biosurfactants, oil degraders, glycolipids.

Для ликвидации антропогенного воздействия на природу активно используются поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Они нашли своё применение как компоненты диспергентов, применяемых для устранения разливов нефти и нефтепродуктов, в составе

препаратов для увеличения нефтеотдачи и т. д. [1, 2].

При этом возрастает актуальность поиска и применения препаратов, которые, принимая участие в ликвидации антропогенного ущерба, сами не наносят вреда окружающей среде. В промышленности сформировался чёткий тренд на «зелёные технологии», что требует новых, природоподобных веществ и технологий [3, 4].

Среди природных ПАВ особого внимания заслуживает группа веществ, получивших название биосурфактанты – амфифильные вещества, обладающие поверхностно-активными свойствами и при этом являющиеся природными соединениями, способными к биоразложению аборигенной микрофлорой [5–7]. Наиболее интересными, с точки зрения коммерческого использования, являются моно- и дирамнолипиды, которые уже сейчас в ряде стран используются в технологиях повышения нефтеотдачи для извлечения нефти, оставшейся в пластах после первичных и вторичных процедур добычи [8].

Условная патогенность для человека и растений основных продуцентов моно- и дирамнолипидов – псевдомонад, в достаточной мере ограничивает их промышленное применение, потому необходимо получение методами генной инженерии гетерологичных продуцентов рамнолипидов на основе безопасных микроорганизмов [9]. Данные безопасные гетерологичные продуценты могут позволить также получать рамнолипиды с индивидуальной структурой, с уникальными физико-химическими свойствами; а также могут открыть доступ к использованию необычных субстратов в качестве источника углерода для получения рамнолипидов [9].

Таким образом, получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов является актуальным и перспективным для получения в промышленных масштабах рамнолипида – биосурфактанта с высокой эффективностью, что позволит создать качественные, высокоэффективные микробные биопрепараты на основе гетерологичных продуцентов.

Целью данной работы является получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов на основе штаммов *Escherichia coli* BLWT, *Pseudomonas viridiflava* A1C1223.

Для достижения цели были выполнены следующие задачи: вырезаны из геномной ДНК *Pseudomonas aeruginosa* В-6643 вместе с промотором гены *rhlAB*, получены бактерио-трансформанты по генам *rhlAB*, при помощи

ПЦР подтверждено наличие вставки, проверена функциональная активность гетерологичной вставки индикаторным тестом, подтверждена продукция рамнолипидов при помощи ИК-Фурье спектроскопии.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили:

1. *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643) (из коллекции Национального биоресурсного центра Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия) с известной продуктивностью 43,3 г/л рамнолипидов.

2. *Escherichia coli* BLWT – генно-инженерный штамм (из коллекции кафедры биотехнологии ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», Киров, Россия).

3. *Pseudomonas viridiflava* A1C1223 (из коллекции кафедры микробиологии ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», Киров, Россия).

Также для исследования использовали полученные в ходе работы трансформанты E1–E21 на основе штамма *E. coli* BLWT и P1–P12 на основе штамма *P. viridiflava* A1C1223.

Условия постановки экспериментов.

Штаммы *P. aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643), *E. coli* BLWT выращивали и поддерживали на LB-агаре при 37 °С, *P. viridiflava* A1C1223 на глюкозо-пептонном агаре при 25 °С. Трансформанты E1–E21 выращивали на LB-бульоне (триптон 10 г/л, дрожжевой экстракт 5 г/л, NaCl 5 г/л) при 37 °С. Трансформанты P1–P12 выращивали и поддерживали на LB-бульоне при 25 °С. Все работы с микробными культурами проводились в асептических условиях.

Выделение ДНК из *P. aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643) осуществляли методом лизиса клеток в буфере, содержащем 2% цетилтриметиламмоний бромид, 1,4 М NaCl, 50 мМ Tris-HCl, 20 мМ ЭДТА [10]. Лизат инкубировали при 65 °С 35 мин в твёрдотельном термостате «Гном» (ООО «НПО ДНК-Технология», Россия). ДНК очищали дважды при помощи хлороформа от примесей, затем ДНК осаждали холодным этанолом в виде натриевой соли.

Рестриктию генов кластера рамнолипидов вместе с нативным промотором осуществляли при помощи эндонуклеаз [11]. Из препарата геномной ДНК при помощи рестриктазы Bgl II и последующего электрофореза в 0,8% агарозном геле выделили генный кластер

рамнолипидов *ghlAB* с нативным промотором, фрагмент длиной 3673 пар нуклеотидов [11].

Лигирование в *pAl2-T* вектор осуществляли по методике [12]. Фрагменты ДНК были выделены из агарозного геля и использованы в качестве вставки в вектор *pAl2-T* «Евроген» в соответствии с протоколом лигирования компании «Евроген», приложенным к комплекту вектора. Условия лигирования: в пробирке Эппендорф на 0,5 мл смешивали: Т4 ДНК-лигаза – 1 мкл; буфер для лигазы 10x – 1 мкл, стерильная вода – 7,3 мкл, продукт – 0,5 мкл, вектор *pAl2-T* – 1 мкл. Смесь инкубировали 16 часов при 4 °С [12].

Для трансформации бактериальных культур использовали ночные культуры *E. coli* BLWT и *P. viridiflava* A1C1223 на жидкой среде LB. Трансформацию осуществляли химическим способом с использованием 0,1 М раствора CaCl_2 [13]. Трансформированные клетки инкубировали 1 ч при 37 °С, высевали на агаризованную среду LB с 0,01% ампициллина. На следующие сутки проводили отбор содержащих вставку белых колоний, которые пересеивали в жидкую среду LB.

Проверку наличия вставки осуществляли при помощи локус-специфической ПЦР, электрофорез производили в 0,8% агарозном геле, гель окрашивали раствором бромистого этидия [14]. Использовали пару праймеров: F: 5'-ATGCGGCGCGAAAGTCTGTTGG-3', R: 5'-TCAGGACGCAGCCTTCAGCCATC-3', температура отжига 54 °С, длина продукта составляет 2234 пары нуклеотидов (п. н.). ДНК выделяли по прежней методике с буфером, содержащем 2% СТАВ [10].

Для детекции рамнолипида в культуральной жидкости потенциальных гетерологичных продуцентов использовали индикаторный метод с использованием раствора цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ) 4% и метиленового синего. Рамнолипиды образуют интенсивно окрашенный осадок от ярко-голубого до синего цвета при реакции с компонентами смеси за сутки [15].

Для подтверждения наличия рамнолипидов в культуральной жидкости использовали ИК-Фурье спектроскопию. Производили снятие спектров на приборе марки SILAB i-Red 7800u-L (Beijing Beifen-Ruili Analytical Instrument (Group) Co., Ltd, Китай). Для подготовки проб производили трёхкратную экстракцию рамнолипидов этилацетатом из бесклеточной культуральной жидкости трансформантов [16]. Далее упаривали органическую фазу. Выполняли сушку осадка

в вакуумной сушилке LABCONCO (Labconco Corporation, США). Препарат для ИК-Фурье спектроскопии изготавливали в форме таблетки при помощи ручного пресса: 1,5 мг содержащей рамнолипиды просушенной смеси и 148,5 мг KBr [17].

Определение количества образуемого рамнолипида путём взвешивания осадка после выпаривания экстракта из культуральной жидкости осуществляли гравиметрически на прецизионных весах Adventurer OHAUS AR2140 (Ohaus, США).

Статистическая обработка данных. Массу экстрагированного рамнолипида после вакуумной сушки измеряли трижды. Вычисляли среднее значение и его стандартное отклонение. Рассчитывали по коэффициенту Стьюдента для сухой массы рамнолипида доверительный интервал при объёме выборки $n=3$ и значении доверительной вероятности: $P=0,95$.

Результаты и обсуждение

Результаты получения гетерологичных продуцентов рамнолипидов на основе штамма *E. coli* BLWT. Из лизата *P. aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643) при помощи буфера с 2% цетилтриметиламмоний бромидом была выделена ДНК. При помощи рестриктазы *Bgl* II был получен фрагмент длиной 3673 п. н., содержащий промотор и гены *ghlAB* кластера биосинтеза рамнолипидов, который в дальнейшем был лигирован в плазмидный вектор *pAl2-T* и использован при кальциевой трансформации бактерий *E. coli* BLWT. Проведение бело-голубой селекции суточных колоний позволило отобрать колонии E1–E21, как потенциально имеющие гетерологичную вставку. Наличие вставки было подтверждено при помощи ПЦР с использованием пары праймеров к границам структурных генов рамнозилтрансферазы *ghlAB* с искомой длиной фрагмента: 2234 п. н. (рис. 1). Наличие вставки подтверждено у трансформанта E14.

Индикаторный тест на наличие целевых продуктов – рамнолипидов выявил наличие интенсивно окрашенного осадка с метиленовым синим и цетилтриметиламмоний бромидом у трансформанта E14 (рис. 2, см. цв. вкладку IV).

Количественная оценка синтезируемых трансформантом E14 рамнолипидов. Сухая масса экстракта составила $1,70 \pm 0,48$ мг. С учётом объёма изначальной пробы культуральной жидкости 0,5 мл, отобранной для дальнейшей

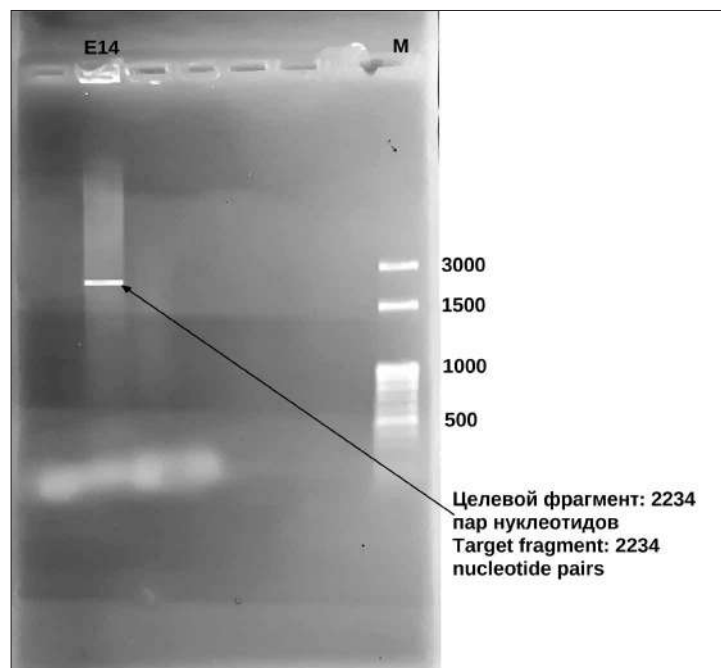


Рис. 1. Электрофореграмма результатов ПЦР на наличие вставки в виде структурных генов *rhlAB* у трансформанта E14
Fig. 1. Electrophoregram of PCR results for the presence of an insertion in the form of *rhlAB* structural genes in E14

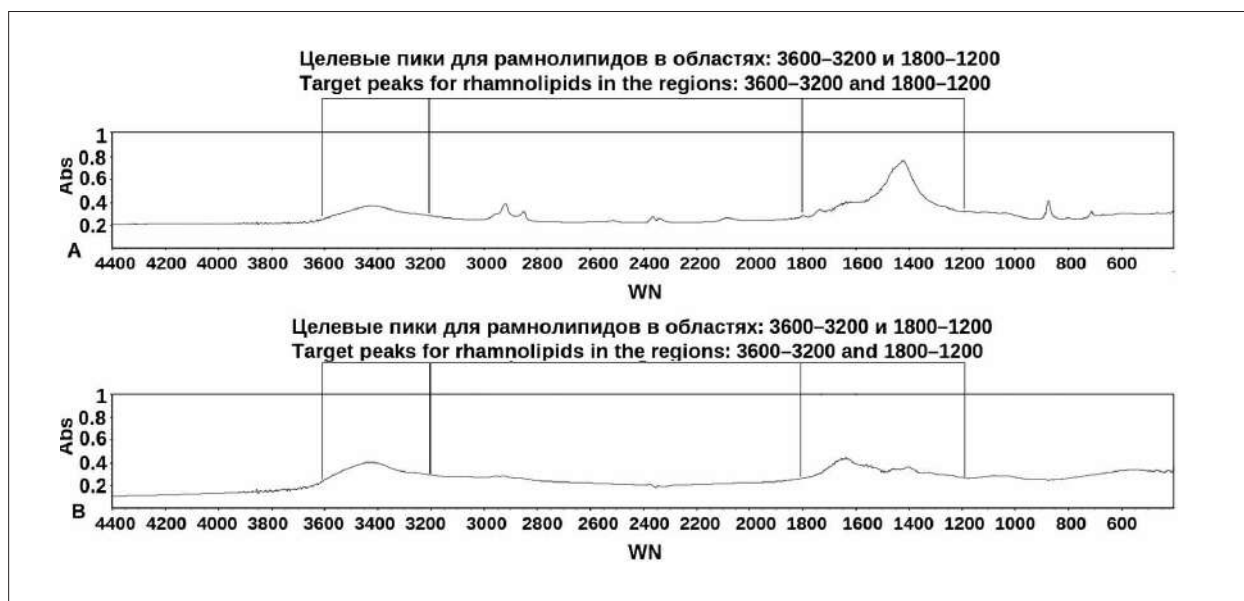


Рис. 3. Результаты ИК-Фурье спектроскопии экстрактов рамнолипидов:
 А – *P. aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643), В – трансформант E14
Fig. 3. Results of FT-IR spectrometry of rhamnolipid extracts:
 А – *P. aeruginosa* ATCC 9027 (VKPM V-6643), В – transformant E14

экстракции, продуктивность трансформанта E14 составила $3,40 \pm 0,96$ г/л. Наличие рамнолипидов в экстракте было подтверждено методом ИК-Фурье спектроскопии, экстракт культуральной жидкости трансформанта E14 проявлял пики в областях $3600-3200$ и $1800-1200$ cm^{-1} (рис. 3), которые являются характерными для рамнолипидов [17].

Результаты получения гетерологических продуцентов на основе штамма *P. viridiflava* A1C1223. Трансформация *P. viridiflava* A1C1223 плазмидным вектором pAl2-T, лигированным фрагментом длиной 3673 п. н., содержащим промотор и гены *rhlAB* кластера биосинтеза рамнолипидов, дала следующие результаты. По итогам бело-голубой селекции

М. Н. Барамзин, С. Г. Литвинец, Е. А. Мартинсон
«Получение гетерологичных продуцентов рамнолипидов
для промышленного производства высокоэффективного
биосурфактанта». С. 135.

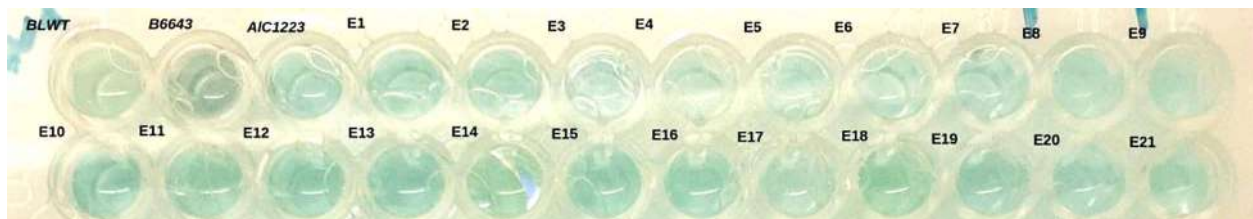


Рис. 2. Результаты индикаторного анализа наличия рамнолипидов в культуральной жидкости у исходных штаммов (обозначенных В-6643, BLWT, AIC1223) и трансформантов E1–E21 при помощи реактива со СТАВ и метиленовым синим. Положительная реакция у E14 и у *P. aeruginosa* ATCC 9027 (ВКПМ В-6643) в виде образования синего осадка

Fig. 2. Results of indicator analysis of the presence of rhamnolipids in the culture liquid of the strains used and E1–E21 using a reagent with STAB and methylene blue. A positive reaction in E14 and *P. aeruginosa* ATCC 9027 in the form of the formation of blue precipitate

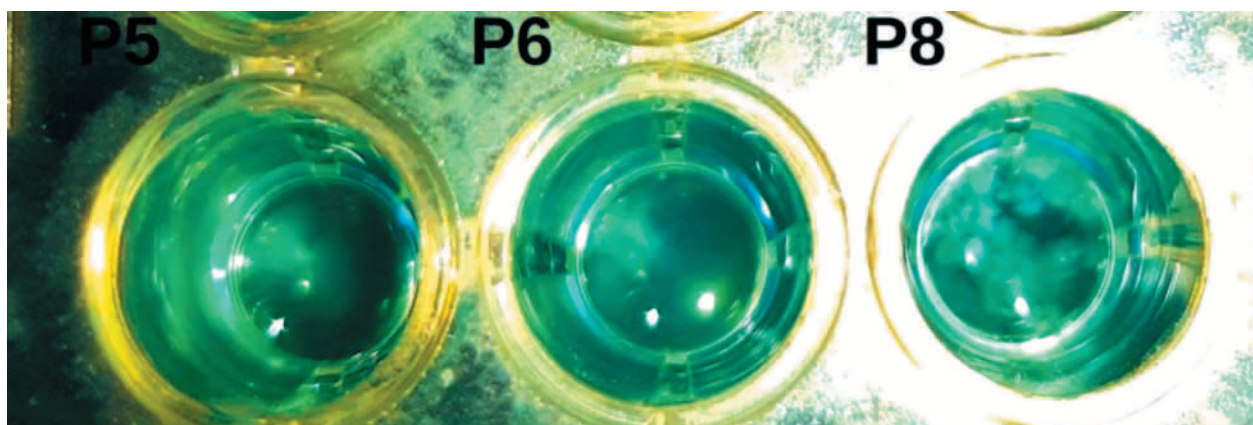


Рис. 5. Результаты индикаторного анализа наличия рамнолипидов в культуральной жидкости. Положительная реакция у трансформантов P5, P6, P8 в виде образования светло-синего осадка

Fig. 5. Results of indicator analysis of the presence of rhamnolipids in the culture fluid. Positive reaction in transformants P5, P6, P8 in the form of the formation of a light blue precipitate

были выбраны колонии P1–P12, как имеющие вставку, наличие вставки было подтверждено при помощи ПЦР с использованием пары праймеров к границам структурных генов рамнозилтрансферазы *rhlAB* с искомой длиной фрагмента у трансформантов P5, P6 и P8 (рис. 4).

В индикаторном тесте с метиленовым синим и цетилтриметиламмоний бромидом у трансформантов P5, P6 и P8 был подтверждён синтез целевых продуктов – рамнолипидов (рис. 5, см. цв. вкладку IV).

В результате гравиметрической оценки этилацетатных экстрактов культуральных жидкостей трансформантов P5, P6 и P8 сухая масса экстрактов составила $166,00 \pm 0,05$; $100,00 \pm 0,05$; $90,00 \pm 0,05$ мг соответственно. С учётом изначально отобранной для экстракции пробы 0,5 мл продуктивность трансформантов P5, P6 и P8 составляет, соответственно, $332,00 \pm 0,10$, $200,00 \pm 0,10$, $180,00 \pm 0,10$ г/л рамнолипидов. Методом ИК-Фурье спектроскопии по наличию характерных пиков в областях $3600\text{--}3200$ и $1800\text{--}1200$ cm^{-1} [17] подтверждено наличие рамнолипидов в полученных экстрактах (рис. 6).

Выводы

В результате проделанной работы был получен гетерологичный продуцент рамнолипидов трансформант E14 на основе генно-инженерного *E. coli* BLWT. Он обладает способностью к биосинтезу рамнолипидов, что подтверждается совпадениями в ИК-Фурье спектрах в характерных для рамнолипидов областях – $3600\text{--}3200$ cm^{-1} , $1800\text{--}1200$ cm^{-1} , экстрактов бесклеточных культуральных жидкостей исходного продуцента и полученного гетерологичного продуцента. Продуктивность трансформанта E14 составила $3,40 \pm 0,96$ г/л рамнолипида.

На основе штамма *P. viridiflava* A1C1223 по аналогичной методике были получены три гетерологичных продуцента рекомбинантных рамнолипидов трансформанты P5, P6, P8, у которых продуктивность составила, соответственно, $332,00 \pm 0,10$, $200,00 \pm 0,10$, $180,00 \pm 0,10$ г/л.

Существенная разница в продукции рамнолипидов у различных трансформантов может быть объяснена следующими причина-

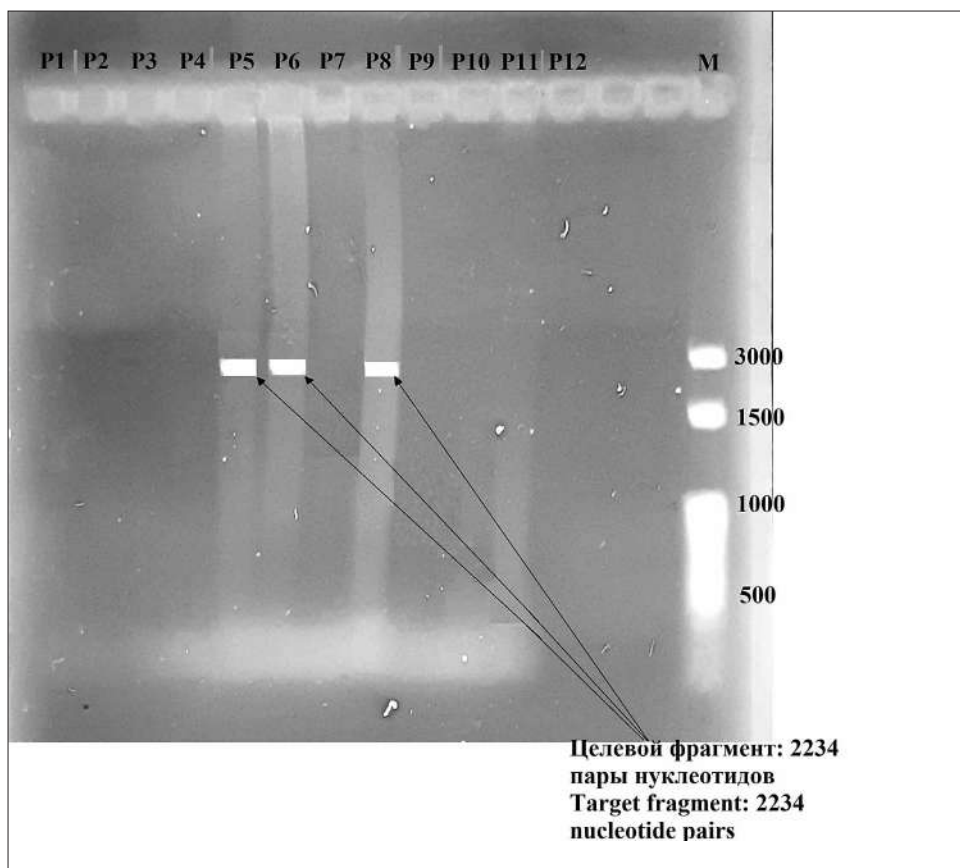


Рис. 4. Электрофореграмма результатов ПЦР на наличие вставки в виде структурных генов *rhlAB* у P1–P12. Целевой фрагмент подтверждён у трансформантов P5, P6, P8
Fig. 4. Electrophoregram of PCR results for the presence of an insert in the form of the *rhlAB* structural genes in P1–P12. P5, P6, P8 have the target fragment

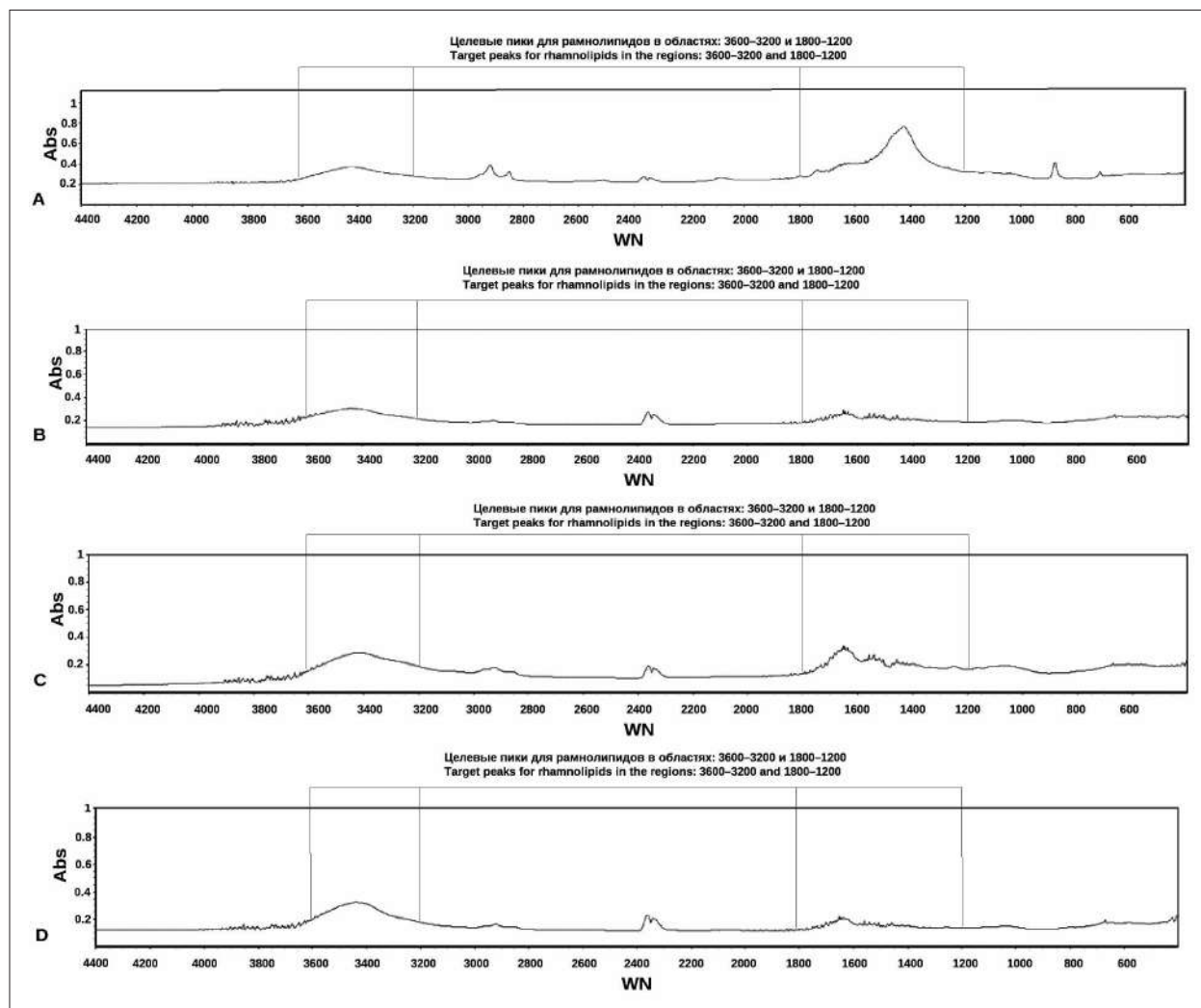


Рис. 6. Результаты ИК-Фурье спектрометрии экстрактов рамнолипидов:

A – *P. aeruginosa* ATCC 9027 (VKPM B-6643), B – трансформант P5,

C – трансформант P6, D – трансформант P8

Fig. 6. Results of FT-IR spectrometry of rhamnolipid extracts:

A – *P. aeruginosa* ATCC 9027 (VKPM V-6643), B – P5 transformant,

C – P6 transformant, D – P8 transformant

ми: бактерии *P. viridiflava* A1C1223 обладают большей генетической и метаболической близостью к основному продуценту, потому вставка в них работает эффективнее, чем в *E. coli* BLWT; разница в продуктивности у трансформантов P5, P6, P8 может быть объяснена тем, что при холодовом шоке в ходе трансформации могли возникнуть мутации, которые привели к различиям в уровнях активности вставки.

В дальнейшем для полученных трансформантов будут оптимизированы условия культивирования с целью получения максимальных выходов целевого продукта. Рамнолипиды и их продуценты станут основой технологии производства биопрепарата для ремедиации загрязнённых нефтепродуктами природных объектов.

Литература

1. Asadov Z.H., Huseynova K.A., Rahimov R.A., Ahmadova G.A., Zubkov F.I. Alkyl chain and head-group effect of mono- and diisopropylolalkylamine-polymethacrylic acid complexes in aqueous solution // J. Mol. Liq. 2017. V. 244. P. 533–539. doi: 10.1016/j.molliq.2017.09.042
2. Ren Z., Fu L., Chen W., Qiu X., Chen L., Liao K., Wei M., Shao M. Emulsions synergistic-stabilized by a hydroxyl sulfobetaine surfactant and SiO₂ nanoparticles and their potential application for enhanced oil recovery // RSC Adv. 2023. V. 13. No. 36. P. 25518–25528. doi: 10.1039/d3ra03427e
3. Giwa A., Chalermthai B., Shaikh B., Taher H. Green dispersants for oil spill response: A comprehensive review of recent advances // Mar. Pollut. Bull. 2023. V. 193. Article No. 115118. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115118

4. Lv Y., Sun S., Chen X. Enhanced environment friendly surfactant production by the glycerolysis of castor oil using amino acid ionic liquid as a catalyst // *Ind. Crops Prod.* 2021. V. 170. Article No. 113680. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113680

5. Banat I.M. Biosurfactants production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: a review // *Bioresour. Technol.* 1995. V. 51. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/0960-8524(94)00101-6

6. Sarubbo L.A., Silva M. da G.C., Durval I.J.B., Bezerra K.G.O., Ribeiro B.G., Silva I.A., Twigg M., Banat I.M. Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives // *Biochem. Eng. J.* 2022. V. 181. Article No. 108377. doi: 10.1016/j.bej.2022.108377

7. Mulligan C.N. Environmental applications for biosurfactants // *Environ. Pollut.* 2005. V. 133. No. 2. P. 183–198. doi: 10.1016/j.envpol.2004.06.009

8. Banat I.M., Makkar R.S., Cameotra S.S. Potential commercial applications of microbial surfactants // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. V. 53. No. 5. P. 495–508. doi: 10.1007/s002530051648

9. Wittgens A., Rosenau F. Heterologous rhamnolipid biosynthesis: advantages, challenges, and the opportunity to produce tailor-made rhamnolipids // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. V. 8. No. 1. Article No. 594010. doi: 10.3389/fbioe.2020.594010

10. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the “modified” CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol // *Appl. Plant. Sci.* 2023. V. 11. No. 3. Article No. e11517. doi: 10.1002/aps3.11517

11. Yan P., Zeng Y., Shen W., Tuo D., Li X., Zhou P. Nimble cloning: a simple, versatile, and efficient system for standardized molecular cloning // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. V. 7. No. 1. Article No. 460. doi: 10.3389/fbioe.2019.00460

12. Evrogen. Основные свойства pAL2-T вектора [Электронный ресурс] <https://evrogen.ru/kit-user-manuals/pAL2-T.pdf> (Дата обращения: 16.02.2024).

13. Mandel M., Higa A. Calcium-dependent bacteriophage DNA infection // *J. Mol. Biol.* 1970. V. 53. No. 1. P. 159–162. doi: 10.1016/0022-2836(70)90051-3

14. Garibyan L., Avashia N. Polymerase chain reaction // *J. Invest. Dermatol.* 2013. V. 133. No. 3. P. 1–4. doi: 10.1038/jid.2013.1

15. Eslami P., Hajfarajollah H., Bazsefidpar S. Recent advancements in the production of rhamnolipid biosurfactants by *Pseudomonas aeruginosa* // *RSC Adv.* 2020. V. 10. No. 56. P. 34014–34032. doi: 10.1039/d0ra04953

16. Ramya Devi K.C., Sundaram R.L., Vajiravelu S., Vasudevan V., Gnanambal M.E.K. Structure elucidation and proposed *de novo* synthesis of an unusual mono-rhamnolipid by *Pseudomonas guguanensis* from Chennai Port area // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. No. 1. Article No. 5992. doi: 10.1038/s41598-019-42045-9

17. Leitermann F., Syldatk C., Hausmann R. Fast quantitative determination of microbial rhamnolipids from cultivation broths by ATR-FTIR Spectroscopy // *J. Biol. Eng.* 2008. V. 2. Article No. 13. doi: 10.1186/1754-1611-2-13

References

1. Asadov Z.H., Huseynova K.A., Rahimov R.A., Ahmadova G.A., Zubkov F.I. Alkyl chain and head-group effect of mono- and diisopropylolalkylamine-polymethacrylic acid complexes in aqueous solution // *J. Mol. Liq.* 2017. V. 244. P. 533–539. doi: 10.1016/j.molliq.2017.09.042

2. Ren Z., Fu L., Chen W., Qiu X., Chen L., Liao K., Wei M., Shao M. Emulsions synergistic-stabilized by a hydroxyl sulfobetaine surfactant and SiO₂ nanoparticles and their potential application for enhanced oil recovery // *RSC Adv.* 2023. V. 13. No. 36. P. 25518–25528. doi: 10.1039/d3ra03427e

3. Giwa A., Chalermthai B., Shaikh B., Taher H. Green dispersants for oil spill response: A comprehensive review of recent advances // *Mar. Pollut. Bull.* 2023. V. 193. Article No. 115118. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115118

4. Lv Y., Sun S., Chen X. Enhanced environment friendly surfactant production by the glycerolysis of castor oil using amino acid ionic liquid as a catalyst // *Ind. Crops Prod.* 2021. V. 170. Article No. 113680. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113680

5. Banat I.M. Biosurfactants production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: a review // *Bioresour. Technol.* 1995. V. 51. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1016/0960-8524(94)00101-6

6. Sarubbo L.A., Silva M. da G.C., Durval I.J.B., Bezerra K.G.O., Ribeiro B.G., Silva I.A., Twigg M., Banat I.M. Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives // *Biochem. Eng. J.* 2022. V. 181. Article No. 108377. doi: 10.1016/j.bej.2022.108377

7. Mulligan C.N. Environmental applications for biosurfactants // *Environ. Pollut.* 2005. V. 133. No. 2. P. 183–198. doi: 10.1016/j.envpol.2004.06.009

8. Banat I.M., Makkar R.S., Cameotra S.S. Potential commercial applications of microbial surfactants // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. V. 53. No. 5. P. 495–508. doi: 10.1007/s002530051648

9. Wittgens A., Rosenau F. Heterologous rhamnolipid biosynthesis: advantages, challenges, and the opportunity to produce tailor-made rhamnolipids // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. V. 8. No. 1. Article No. 594010. doi: 10.3389/fbioe.2020.594010

10. Schenk J.J., Becklund L.E., Carey S.J., Fabre P.P. What is the “modified” CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol // *Appl. Plant. Sci.* 2023. V. 11. No. 3. Article No. e11517. doi: 10.1002/aps3.11517

11. Yan P., Zeng Y., Shen W., Tuo D., Li X., Zhou P. Nimble cloning: a simple, versatile, and efficient system for standardized molecular cloning // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. V. 7. No. 1. Article No. 460. doi: 10.3389/fbioe.2019.00460
12. Evrogen. Basic properties of the pAL2-T vector [Internet resource] <https://evrogen.ru/kit-user-manuals/pAL2-T.pdf> (Accessed: 16.02.2024).
13. Mandel M., Higa A. Calcium-dependent bacteriophage DNA infection // *J. Mol. Biol.* 1970. V. 53. No. 1. P. 159–162. doi: 10.1016/0022-2836(70)90051-3
14. Garibyan L., Avashia N. Polymerase chain reaction // *J. Invest. Dermatol.* 2013. V. 133. No. 3. P. 1–4. doi: 10.1038/jid.2013.1
15. Eslami P., Hajfarajollah H., Bazsefidpar S. Recent advancements in the production of rhamnolipid biosurfactants by *Pseudomonas aeruginosa* // *RSC Adv.* 2020. V. 10. No. 56. P. 34014–34032. doi: 10.1039/d0ra04953
16. Ramya Devi K.C., Sundaram R.L., Vajiravelu S., Vasudevan V., Gnanambal M.E.K. Structure elucidation and proposed *de novo* synthesis of an unusual mono-rhamnolipid by *Pseudomonas guguanensis* from Chennai Port area // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. No. 1. Article No. 5992. doi: 10.1038/s41598-019-42045-9
17. Leitermann F., Sylatk C., Hausmann R. Fast quantitative determination of microbial rhamnolipids from cultivation broths by ATR-FTIR Spectroscopy // *J. Biol. Eng.* 2008. V. 2. Article No. 13. doi: 10.1186/1754-1611-2-13

Антибиотик ципрофлоксацин в водных и почвенных средах: реакция микроводорослей

© 2024. А. Д. Батаков¹, аспирант, А. П. Кирюшина², к. б. н., м. н. с.,
Д. Н. Маторин¹, д. б. н., профессор, В. А. Терехова¹, д. б. н., профессор,

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова,
119071, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33,
e-mail: vterekhova@gmail.com

Накопление фармпрепаратов и антибиотиков в окружающей среде вызывают всё большую тревогу в связи с воздействием на представителей всех звеньев трофической цепи природных экосистем. В модельных экспериментах исследовано действие широко распространённого антибиотика ципрофлоксацина на зелёные протококковые микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* и *Chlorella vulgaris* в воде и в водных экстрактах почв (искусственная стандартная почва, техногрунт, дерново-подзолистая почва). По результатам оценки флуоресцентных параметров двумя разными методами (приборы Флюорат 02-5М и Water-PAM) показано, что при невысоких концентрациях антибиотика 5 и 10 мг/л наблюдалось явление гормезиса, а при повышении от 20 до 50 мг/л зафиксировано снижение фотосинтетической активности водорослей. Проведено сравнение медианной (среднеэффективной) концентрации антибиотика ЭК₅₀, подавляющей на 50% флуоресцентные характеристики микроводорослей на 3 сутки экспозиции в разных средах. Снижение токсичности исследованной дозы ципрофлоксацина (300 мг/л) в ряду исследуемых объектов можно представить следующим образом: вода > техногрунт > искусственная стандартная почва > дерново-подзолистая почва, что отражает процент ингибирования тест-функции относительно контроля (образцы без антибиотика) соответственно на 91,5; 80,0; 62,5 и 60,0%. В почвенной матрице ингибирующий эффект антибиотика выражен слабее (на 10–30%), что, вероятно, обусловлено протекторными свойствами гуминовых веществ, которые сорбируют антибиотик или его метаболиты.

Ключевые слова: альготестирование, экотоксичность, антибиотик ципрофлоксацин, вода, почва, гуминовые вещества.

Antibiotic ciprofloxacin in water and soil media: reaction of microalgae

© 2024. A. D. Batakov¹ ORCID: 0000-0002-2105-0141, A. P. Kiryushina² ORCID: 0000-0001-5374-0238,
D. N. Matorin¹ ORCID: 0000-0002-6164-5625, V. A. Terekhova¹ ORCID: 0000-0001-9121-639X²

¹Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,

²Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,

33, Leninsky prospect, Moscow, Russia, 119071,

e-mail: vterekhova@gmail.com

Pharmaceuticals and antibiotics in the environment are of increasing concern due to the impact on representatives of all links in the food chain of natural ecosystems. The effect of the widespread antibiotic ciprofloxacin (Cip) on the green protococcal microalgae *Scenedesmus quadricauda* and *Chlorella vulgaris* in water and aqueous soil extracts (artificial standard soil, technosoil, soddy-podzolic soil) was studied in model experiments. Fluorescent parameters were assessed by two different methods (Fluorat 02-5M and Water-PAM devices). The phenomenon of hormesis was observed at low antibiotic concentrations of 5 and 10 mg/L. A decrease in the photosynthetic activity of algae was recorded at an increase of Cip content from 20 to 50 mg/L. A comparison was made of the median (average effective) concentration of the EC₅₀ antibiotic, which suppresses the fluorescent characteristics of microalgae by 50% on 3 days of exposure in different media. The decrease in the toxicity of the studied dose of Cip (300 mg/L) in a number of studied objects can be represented as follows: water > technosoil > artificial standard soil > soddy-podzolic soil. It reflects the percentage of inhibition of the test function relative to the control (samples without antibiotic) by 91.5, 80.0, 62.5, and 60.0% respectively. In the soil matrix, the inhibitory effect of the antibiotic is less pronounced (by 10–30%), probably due to the protective properties of humic substances that adsorb the antibiotic or its metabolites.

Keywords: algotesting, ecotoxicity, antibiotic ciprofloxacin, water, soil, humic substances.

Интенсивный рост производства и применения лекарственных препаратов одновременно создаёт проблему из-за неконтролируемого поступления их в природные среды – почву, воду, воздух. Одним из широко распространённых антибиотиков считается ципрофлоксацин (Cip), источником которого в водных объектах и почвах являются сточные воды фармкомпаний, животноводческих ферм и пастбищ [1–3]. Механизмы воздействия на природные сообщества и факторы снижения экологического риска от распространения антибиотика в окружающей среде изучены недостаточно.

Отмечено значительное влияние Cip на структуру почвенных микробиомов по ингибированию метаболической активности определённых групп микробных сообществ [4]. В почве Cip сорбируется каолинитом, глинистыми соединениями, оксидами железа и алюминия [5, 6], а также органическим веществом [7]. Исследования на чилийских почвах Южной Америки показали зависимость сорбции Cip от содержания гумуса [7]. Подобные исследования отсутствуют для типичных для Европейской части России дерново-подзолистых почв.

Цель работы – изучить действие антибиотика ципрофлоксацина на реакции зелёных микроводорослей (*Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bréb и *Chlorella vulgaris* Beijerinck) в водных и почвенных средах. Задачи включали анализ тест-функций микроводорослей в лабораторных экспериментах с моделированием загрязнения изучаемых сред антибиотиком без и с добавлением в почвы сорбента – гуминовых кислот.

Материалы и методы исследования

Антибиотик Cip. Ципрофлоксацин (98% активного вещества) (производства «Келун-Казфарм», Казахстан) вносили в воду в форме водного раствора, а в почву – в виде порошка. Для наглядного проявления и сравнения действия антибиотика в разных средах намеренно применили концентрации, значительно превышающие встречающиеся в природных условиях [2]. Испытывали токсичность следующих концентраций антибиотика: в воде – 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 400 мг/л, в почве – 300, 600, 1200 мг/кг.

Почвы. Использовали три варианта почвенных образцов.

1. Дерново-подзолистая почва (агродерново-подзолистая глееватая глубокопахот-

ная глубокооуглеенная тяжелосуглинистая, подстилаемая мореней, Albic Glossic Retisols (Loamic, Aric Cutanic, Ochric)) с невысоким содержанием гумуса ($C_{\text{орг.}}$ 1,30%, слабо гумусированная) отобрана на территории Солнечногорского района Московской области на территории УОПЭЦ «Чашниково» (56°01'41.7"N 37°11'04.3"E). Почвы этой территории характеризуются как незагрязнённые [8].

2. Техногрунт, представляющий собой сильногумусированный компост отходов с полигона (№ 2), предоставленный ООО «Эко-Граунд», Ставропольский край. Техногрунт характеризовался повышенным содержанием некоторых тяжёлых металлов, однако доля биодоступных токсикантов этой группы была невелика [8].

3. Стандартная искусственная почва – Reference/Standard/Artificial soil (здесь и далее ИСП), приготовленная по протоколу ISO 11268-2, содержала: 10% верхового торфа, 20% каолина, 70% кварцевого песка, pH 6,6.

Для альготестирования готовили водные экстракты из почв в соотношении 1:10 (почва:вода). Почвенную суспензию перемешивали 2 ч на шейкере, отстаивали и фильтровали через бумажный обеззоленный фильтр «белая лента», фильтрат подвергали альготестированию.

Альготестирование проводили согласно методике определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей (ФР.1.39.2007.03223), регламентирующей применение зелёных водорослей хлореллы или сценедесмуса.

При биотестировании действия антибиотика в воде использовали лабораторную альгологически чистую культуру одноклеточных пресноводных водорослей *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bréb., которую выращивали на среде Успенского-1 при температуре 24 °C и постоянном освещении (60 мкмоль квантов·м⁻¹с⁻²). В колбы с серией концентраций антибиотика и в контрольные (без добавления Cip) вносили аликвоты суспензии клеток водорослей (40 · 10³ кл/мл) и инкубировали 72 ч. Для оценки токсичности антибиотика, внесённого в почву, использовали водоросли *Chlorella vulgaris* Beijerinck на водные экстракты почв.

Учитывали стандартные тест-параметры фотосинтетической активности с использованием двух инструментальных методов. На анализаторе Флюорат 02-5М для спектрофото-

метрии (Люмэкс, Санкт-Петербург) регистрировали интенсивность флуоресценции хлорофилла, которая пропорциональна изменению численности клеток. С помощью флуориметра Water-PAM (Walz, Германия) оценивали более тонкие механизмы фотосинтеза, а именно – максимальную эффективность процессов фотосистемы 2, связанную с разложением воды и выделением кислорода, которая характеризуется отношением значений F_v/F_m (максимальный квантовый выход) [9]. Это отношение представляет собой безразмерную энергетическую характеристику фотосинтеза – параметр, который хорошо зарекомендовал себя при оценке различных токсикантов [9, 10], в том числе антибиотиков [11–13] на фотосинтетическую активность.

В качестве сорбента антибиотика испытывали препарат гуминовых кислот (ГК) из леонардита (POW-НА, Humintech).

Измерение рН растворов проводили на рН-метре с автоматической калибровкой HI 2211-02 (Hanna Instruments) потенциометрическим способом.

Измерение минерализации растворов проводили на влагозащищённом портативном кондуктометре Hanna HI 9034 (Hanna Instruments) для контроля необходимых параметров среды согласно требованиям стандартных методик альготестирования на основе тест-культуры пресноводных микроводорослей.

Для статистической обработки применяли программу Microsoft Office Excel 2016 и широко используемый в экотоксикологии пробит-анализ. Опыты выполнены в 3–4 повторностях.

Результаты и обсуждение

Альготестирование эффектов антибиотика Cip в воде. Анализ влияния Cip в воде согласно протоколу альготестирования про-

водили на фоне питательных элементов в составе среды Успенского-1. При добавлении антибиотика к пробам по мере увеличения концентрации Cip наблюдалось небольшое снижение значений рН. К концу экспозиции проб с водорослями значения рН возрастали чуть более, чем на единицу (табл. 1). Такие сдвиги в кислотности среды культивирования водорослей незначительны, но превышают значения, допустимые стандартной методикой альготестирования, которая регламентирует увеличение рН в конце эксперимента не более 1,0 (ФР.1.39.2007.03223).

Зависимость флуоресцентных характеристик водоросли *S. quadricauda* от концентрации Cip, измеренных двумя разными способами в водных средах, представлены на рисунке 1.

По результатам оценки интегральной характеристики – фотосинтетической активности на Флюорате 02-5М – наименьшие испытанные концентрации антибиотика Cip 5 и 10 мг/л вызвали небольшое увеличение тест-параметра водорослей. При повышении концентрации антибиотика (20 мг/л и выше) наблюдалось снижение значений флуоресценции.

Кривая зависимости максимального квантового выхода фотосистемы 2 (F_v/F_m) водоросли *S. quadricauda*, измеренного с помощью флуориметра Water-PAM (рис. 1б), демонстрирует тенденции, в общем виде схожие с измерениями на Флюорате 02-5М. Подавление этой тест-функции не наблюдалось при концентрациях до 20 мг/л, но уже при 50 мг/л заметно уменьшение показателя на 10%, что свидетельствует о существенном снижении фотосинтетической активности микроводорослей.

Расчёт эффективных (действующих) концентраций Cip, вызывающих угнетение фотосинтетической активности водоросли

Таблица 1 / Table 1

Характеристика рН водных проб* с ципрофлоксацином до и после экспозиции водорослей
pH characterization of water samples* with ciprofloxacin before and after algae exposure

Концентрация ципрофлоксацина, мг/л Ciprofloxacin content, mg/L	Значение рН / pH value	
	до начала биотестирования before biotesting	после окончания биотестирования after biotesting
0	7,32	8,67
5	6,62	7,97
10	6,08	7,36
20	5,80	6,99
50	5,22	6,70

Примечание: * – в среде Успенского-1.
Note: * – in Uspensky-1 culture medium.

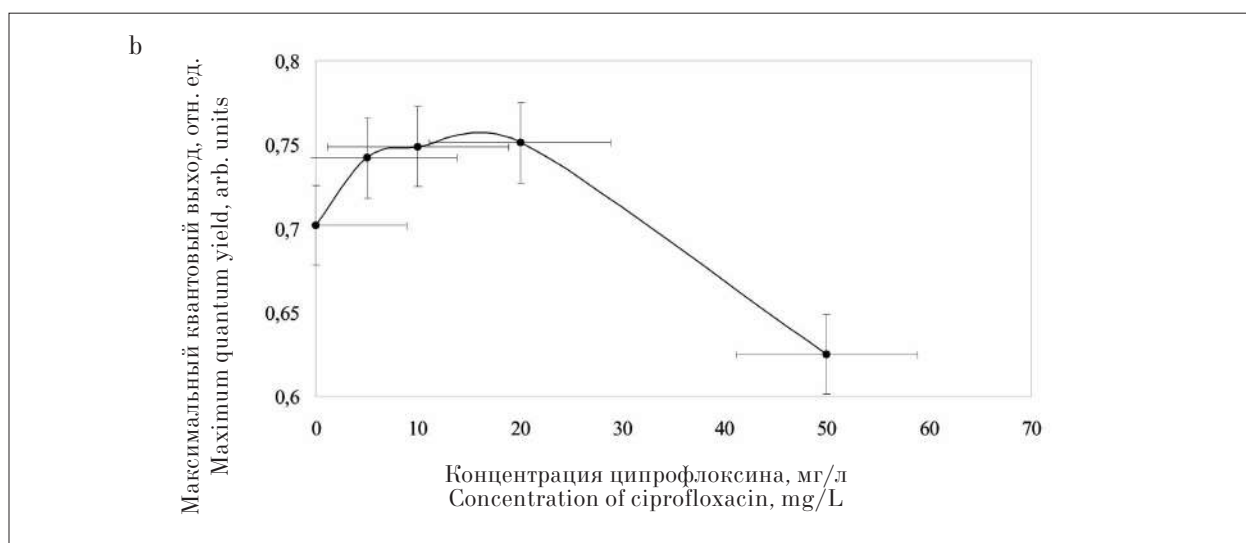
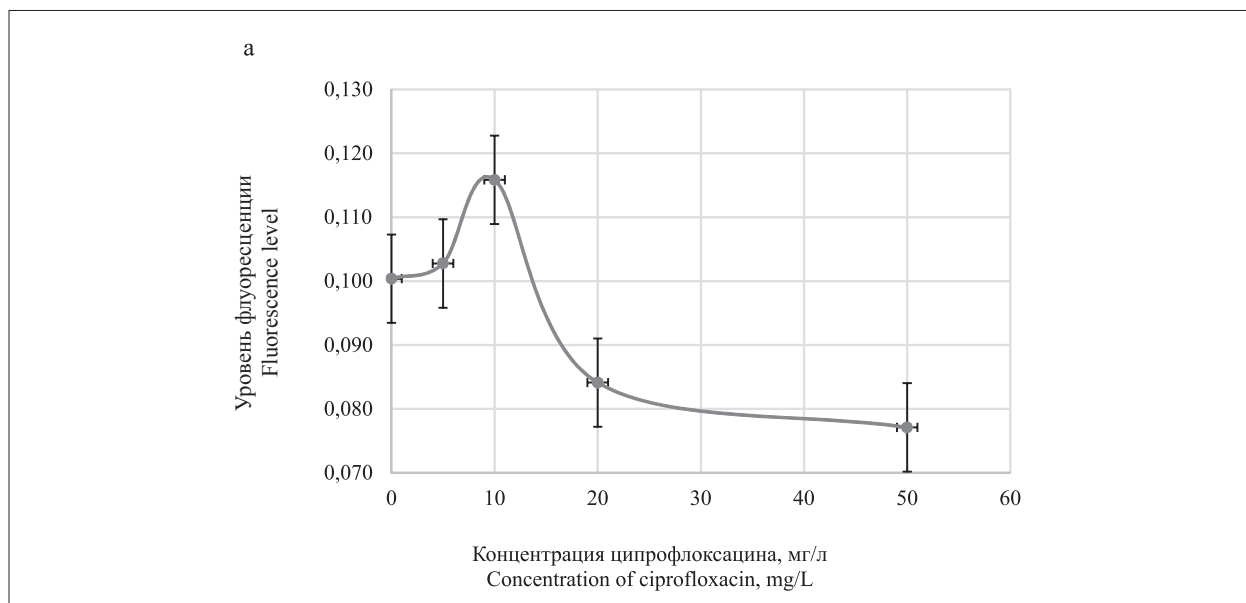


Рис. 1. Изменение флуоресцентных параметров водоросли *S. quadricauda* при действии разных концентраций ципрофлоксацина: а – уровень флуоресценции хлорофилла (Флуорат 02-5М), б – значение максимального квантового выхода F_v/F_M . Время инкубации 72 ч
Fig. 1. Changes in the fluorescent parameters of the *S. quadricauda* under the action of ciprofloxacin: а – the level of chlorophyll fluorescence (Fluorate 02-5M), б – the value of the maximum quantum yield F_v/F_M . Incubation time 72 h

S. quadricauda за установленный период времени, по данным пробит-анализа показателей, полученных с помощью Флуората, оказались такими: медианная ЭК₅₀ – 65,13 мг/л, пороговая безвредная концентрация антибиотика – ЭК₂₀ – 51,00 мг/л. На основе измерения относительной величины максимального квантового выхода энергии F_v/F_M на флуориметре Water-PAM рассчитанная медианная концентрация ЭК₅₀ равна 77,43 мг/л, а пороговая концентрация ЭК₂₀ – 60,00 мг/л. Таким образом, пробит-анализ показал количественные различия в чувствительности измеряемых тест-функций, хотя и не очень значительные.

В целом кривые зависимости доза-эффект характеризовались заметным сходством. В обоих случаях зафиксировано нередко наблюдаемое явление гормезиса, при котором невысокие концентрации Цпр оказывали стимулирующее действие. При повышении концентрации токсическое действие антибиотика прогрессировало. Подобный эффект гормезиса, проявляющийся в стимуляции развития микроводорослей, наблюдался по отношению к другим видам, в частности, к *Pseudokirchneriella subcapitata* при низких концентрациях токсиканта [14–16]. Некоторые авторы этот феномен стимуляции тест-функции микро-

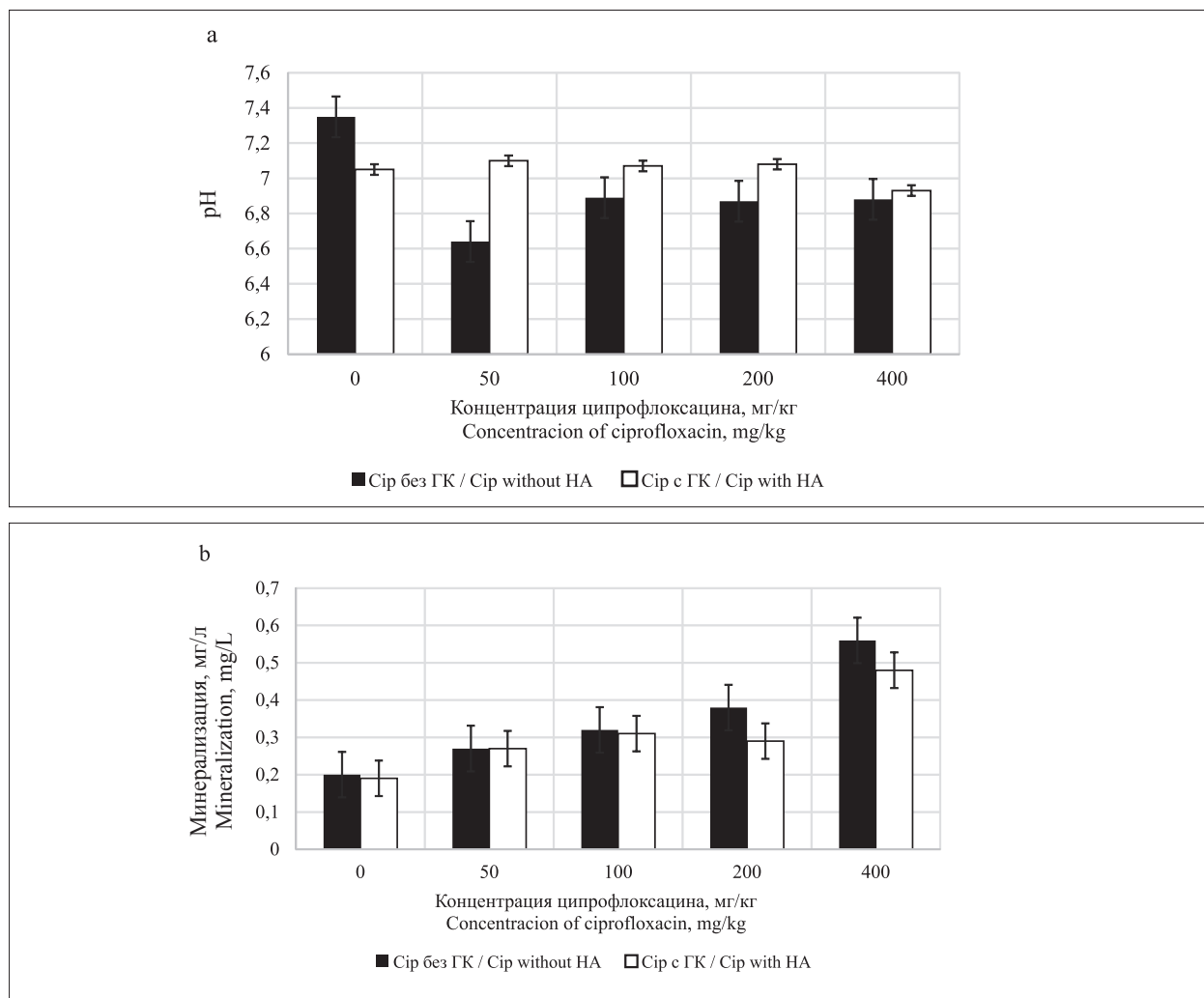


Рис. 2. Влияние ципрофлоксацина (Cip) на pH (а) и минерализацию (b) водных экстрактов почвы. Время инкубации 72 ч
Fig. 2. Influence of ciprofloxacin (Cip) on pH (a) and mineralization (b) of soil aqueous extracts Incubation time 72 h

водорослей небольшими дозами токсикантов предлагают использовать для биотехнологических целей [13].

Альготестирование эффектов антибиотика Cip в почве. Внесение Cip в почву приводило к снижению pH водного экстракта почвенных образцов (рис. 2). Наибольшее снижение pH с 7,35 до 6,64 наблюдалось при концентрации ципрофлоксацина 50 мг/кг.

Действие ципрофлоксацина в водных экстрактах почвенных образцов оценивали без и с внесением сорбента – ГК (5 мг ГК/100 г почвы), добавленного в почву. Присутствие сорбента (5 мг ГК/100 г) приводило к повышению pH во всех случаях относительно вариантов без ГК.

С повышением концентрации антибиотика увеличивалась минерализация растворов (рис. 2). Добавление ГК приводило

к незначительному снижению этого параметра по сравнению с пробами без ГК.

Однако эти изменения кислотности и минерализации среды не критичны для развития пресноводных водорослей.

Влияние возрастающих концентраций антибиотика в почвенных субстратах в интервале от 50 до 400 мг/кг проявилось в заметном изменении фотосинтетических тест-функций водорослей. Среднеэффективная концентрация Cip в почве, испытанная по реакции водоросли *S. quadricauda*, оказалась равной ЭК₅₀ – 150 мг/кг почвы, что более чем в два раза выше по сравнению с водными средами. По итогам измерения на Флюорате расчётное значение ингибирующего эффекта концентрации Cip 300 мг/кг почвы составило 60%. Это расчётное значение мы использовали в дальнейшем для сопоставления проявления активности антибиотиков в разных почвенных субстратах.

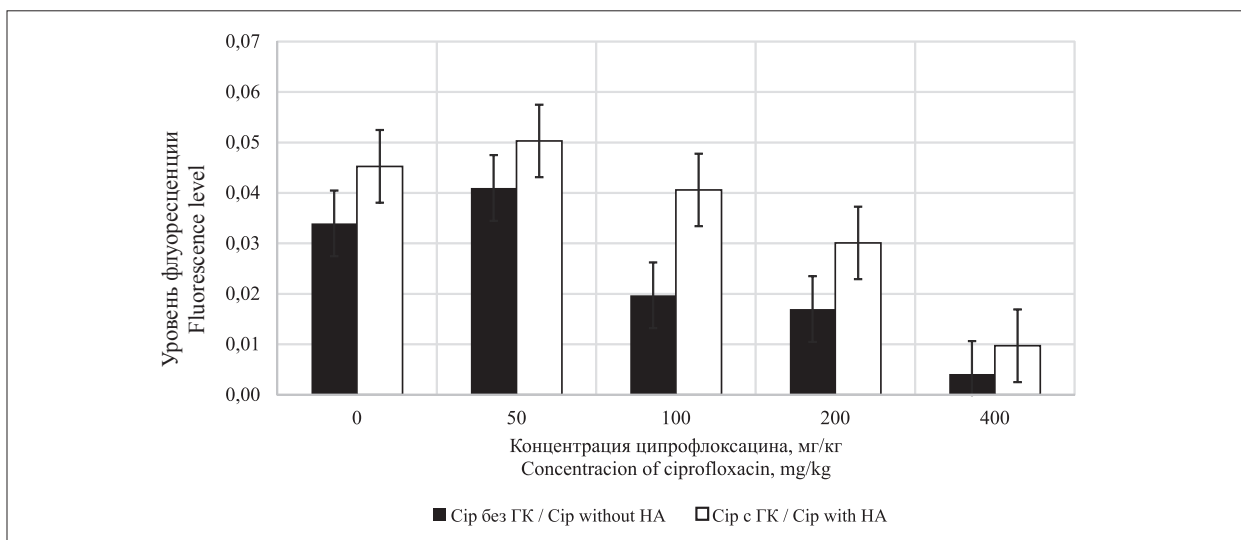


Рис. 3. Зависимость уровня флуоресценции *S. quadricauda* в водном экстракте образцов от концентрации ципрофлоксацина в почве. Измерения проводили на Флюорате 02-5М. Время инкубации 72 ч / **Fig. 3.** Dependence of the *Scenedesmus quadricauda* photosynthetic activity in the soil aqueous extract on the ciprofloxacin content in the soil. Measurements on Fluorate 02-5M. Incubation time 72 h

Таблица 2 / Table 2

Влияние концентрации ципрофлоксацина в техногрунте и искусственной почве на флуоресценцию хлорофилла (экстракт 1:10, Флюорат 02-5М) *Ch. vulgaris*. Время инкубации 72 ч / Effect of ciprofloxacin content in technosoil and artificial soil on chlorophyll fluorescence (extract 1:10, Fluorate 02-5M) *Ch. vulgaris*. Incubation time 72 h

Концентрация ципрофлоксацина, мг/кг Ciprofloxacin content, mg/kg	Значение флуоресценции, отн. ед. Fluorescence value, rel. units	
	Техногрунт 1:10 Technosoil 1:10	ИСП 1:10 Artificial Soil 1:10
0	0,147	0,048
300	0,030	0,018

Добавление ГК в дозе 5 мг/100 г почвы с Сір приводило к снижению токсичности образца почвы (рис. 3).

В присутствии ГК действующая концентрация ЭК₅₀ – 242,88 мг Сір/кг, что заметно выше по сравнению с вариантом без ГК (ЭК₅₀ – 150 мг/кг). Снижение токсического эффекта Сір под действием ГК особенно явно (почти в 2 раза) при высоких концентрациях антибиотика (100, 200 и 400 мг/кг) (рис. 3).

Влияние антибиотика на техногрунт и ИСП исследовали по флуоресцентным параметрам другой стандартизированной тест-культуры водорослей – *Ch. vulgaris*. Сопоставление эффектов Сір в почвенных субстратах на фотосинтетические параметры микроводорослей проводили по одинаковой нагрузке – при дозе внесения антибиотика, равной 300 мг Сір/кг. Ингибирующий эффект при альготестировании техногрунта и ИСП на фотосинтетическую активность *Ch. vulgaris* достигал 80% (табл. 2).

Снижение уровня флуоресценции *Ch. vulgaris* в пробах экстрактов из ИСП было менее выраженным, чем в пробах из техногрунта: 62,5% от контроля (ИСП без антибиотика) (табл. 3). Это, вероятно, объясняется большей сорбционной способностью ИСП по отношению к ципрофлоксацину в сравнении с техногрунтом.

Альготестирование показало токсическое воздействие антибиотика ципрофлоксацина в воде, что выражалось в подавлении фотосинтетической активности зелёных водорослей: при 50 мг Сір/л значение исследуемой тест-функции – флуоресценции хлорофилла – снижалось на 10%. По результатам проведённых исследований двумя биофизическими методами по анализу флуоресценции хлорофилла и фотосинтетической активности с помощью пробит-анализа рассчитаны среднеэффективные концентрации Сір при действии на *S. quadricauda* в водной среде ЭК₅₀ – 65,13 и 77,43 мг/л соответственно.

Значения эффективных концентраций C_{ip} по отношению к водорослям зависят от чувствительности конкретных видов. Так, для *Pseudokirchneriella subcapita* $ЭК_{50} = 3,9$ мг C_{ip} /л [14], для *Chlorella vulgaris* – 20,6 мг C_{ip} /л [17]. Эукариотические микроводоросли показывают меньшую чувствительность, чем прокариотические формы [14, 16]. В частности, для цианобактерии *Microcystis aeruginosa* $ЭК_{50}$ составила 49 мкг C_{ip} /л [16]. В наших экспериментах использованы близкие по таксономическому положению микроводоросли (сценедесмус и хлорелла), которые характеризуются сходными требованиями к среде культивирования. Это даёт нам основание сравнить эффекты одной и той же дозы ципрофлоксацина в разных средах, измеренные с помощью этих двух широко распространённых в природных ценозах видов водорослей.

Среднеэффективная концентрация ципрофлоксацина в почвах, оценённая в стандартном биотесте по реакции микроводорослей в почвенных вытяжках загрязнённых антибиотиком образцов, оказалась значительно выше, чем в пробах воды. По данным пробит-анализа для образца дерново-подзолистой почвы (почвенной вытяжки) среднеэффективная концентрация ципрофлоксацина составила $ЭК_{50} = 150$ мг/л, в присутствии сорбента – 242 мг/л.

Снижение токсического эффекта одной и той же дозы антибиотика ципрофлоксацина (300 мг/л) наблюдалось в ряду: вода > техногрунт > искусственная стандартная почва > дерново-подзолистая почва, что отражает подавление тест-функции на 91,5; 80,0; 62,5 и 60,0 %, соответственно.

Заключение

Подводя итог сравнительному исследованию токсичности ципрофлоксацина в воде и в почве, можно заключить, что в твёрдой почвенной матрице токсический эффект антибиотика выражен слабее (на 10–30%). Этот эффект объясняется протекторными свойствами гуминовых веществ, которые, вероятно, сорбируют антибиотик или его метаболиты, что подтверждается полученными нами данными о снижении токсичности антибиотика при добавлении гуминовых кислот к тестируемым образцам.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

«Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Авторы благодарят к.б.н. Якименко О.С. за предоставление образцов почвогрунта.

Литература

1. Gothwal R., Shashidhar T. Antibiotic pollution in the environment: A Review // Clean – Soil, Air, Water. 2015. V. 43. No. 4. P. 479–489. doi: 10.1002/clen.201300989
2. Терехова В.А., Руднева И.И., Поромов А.А., Парамонова А.И., Кыдралиева К.А. Распространение и биологические эффекты антибиотиков в водных экосистемах (обзор) // Вода: химия и экология. 2019. № 3–6 (119). С. 92–112.
3. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 3. С. 251–265. doi: 10.21285/2500-1582-2021-3-251-265
4. Näslund J., Hedman J.E., Agestrand C. Effects of the antibiotic ciprofloxacin on the bacterial community structure and degradation of pyrene in marine sediment // Aquat. Toxicol. 2008. V. 90 No. 3. P. 223–227. doi: 10.1016/j.aquatox.2008.09.002
5. Gu C., Karthikeyan K.G. Sorption of the antimicrobial ciprofloxacin to aluminum and iron hydrous oxides // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 39. No. 23. P. 9166–9173. doi: 10.1021/es051109f
6. Carrasquillo A.J., Bruland G.L., MacKay A.A., Vasudevan D. Sorption of ciprofloxacin and oxytetracycline zwitterions to soils and soil minerals: Influence of compound structure // Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. No. 20. P. 7634–7642. doi: 10.1021/es01277y
7. Antilen M., Bustos O., Ramirez G., Canales C., Faundez M., Escudey M., Pizarro C. Electrochemical evaluation of ciprofloxacin adsorption on soil organic matter // New Journal of Chemistry. 2016. V. 40. No. 8. P. 7132–7139. doi: 10.1039/c6nj00207b
8. Терехова В.А., Федосеева Е.В., Волкова В.Д., Иванова А.Е., Якименко О.С. Меланинсодержащие микромицеты в почвах и органических отходах // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 204–213. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-204-213
9. Schreiber U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview // Chlorophyll *a* fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in photosynthesis and respiration / Eds. G. Papageorgiou, Govindjee. Dordrecht: Springer, 2004. P. 279–319. doi: 10.1007/978-1-4020-3218-9_11
10. Маторин Д.Н., Рубин А.Б. Флуоресценция хлорофилла высших растений и водорослей. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 256 с.
11. Liu B.Y., Nie X.P., Liu W.Q., Pauline S., Guan C., Martin T.K.T. Toxic effects of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole on photosynthetic apparatus in *Selenastrum capricornutum* // Ecotoxicology and Environmental

Safety. 2011. V. 74. No. 4. P. 1027–1035. doi: 10.1016/j.ecoenv.2011.01.022

12. Wan L., Wu Y., Zhang B., Yang W., Ding H., Zhang W. Effects of moxiooxacin and gatiooxacin stress on growth, photosynthesis, antioxidant responses, and microcystin release in *Microcystis aeruginosa* // J. Hazard. Mater. 2021. V. 409. Article No. 124518. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124518

13. Cui M., Liu Y., Zhang J. The variation of growth rate, photosynthetic activity, and biodiesel productivity in *Synechocystis* sp. PCC 6803 under antibiotic exposure // Bio-Energy Research. 2020. V. 13. P. 955–962. doi: 10.1007/s12155-020-10114-x

14. Martins N., Pereira R., Abrantes N., Pereira J., Gonçalves F., Marques C.R. Ecotoxicological effects of ciprofloxacin on freshwater species: data integration and derivation of toxicity thresholds for risk assessment // Ecotoxicology. 2012. V. 21. P. 1167–1176. doi: 10.1007/s10646-012-0871-x

15. Fu L., Huang T., Wang S., Wang X., Su L., Li C., Zhao Y. Toxicity of 13 different antibiotics towards freshwater green algae *Pseudokirchneriella subcapitata* and their modes of action // Chemosphere. 2016. V. 168. P. 217–222. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.043

16. Robinson A.A., Belden J.B., Lydy M.J. Toxicity of fluoroquinolone antibiotics to aquatic organisms // Environmental Toxicology and Chemistry. 2005. V. 24. No. 2. P. 423–430. doi: 10.1897/04-210R.1

17. Nie X., Wang X., Chen J.U., Zitko V., An T. Response of the freshwater alga *Chlorella vulgaris* to trichloroisocyanuric acid and ciprofloxacin // Environmental Toxicology and Chemistry. 2008. V. 27. No. 1. P. 168–173. doi: 10.1897/07-028.1

References

1. Gothwal R., Shashidhar T. Antibiotic pollution in the environment: A Review // Clean – Soil, Air, Water. 2015. V. 43. No. 4. P. 479–489. doi: 10.1002/clen.201300989

2. Terekhova V.A., Rudneva I.I., Poromov A.A., Paramonova A.I., Kydraliev K.A. Distribution and biological effects of antibiotics in water ecosystems (review) // Voda: khimiya i ekologiya. 2019. No. 3–6 (119). P. 92–112 (in Russian).

3. Timofeeva S.S., Gudilova O.S. Antibiotics in the environment: status and problems // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost. 2021. V. 6. No. 3. P. 251–265 (in Russian). doi: 10.21285/2500-1582-2021-3-251-265

4. Näslund J., Hedman J.E., Agestrand C. Effects of the antibiotic ciprofloxacin on the bacterial community structure and degradation of pyrene in marine sediment // Aquat. Toxicol. 2008. V. 90. No. 3. P. 223–227. doi: 10.1016/j.aquatox.2008.09.002

5. Gu C., Karthikeyan K.G. Sorption of the antimicrobial ciprofloxacin to aluminum and iron hydrous oxides // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 39. No. 23. P. 9166–9173. doi: 10.1021/es051109f

6. Carrasquillo A.J., Bruland G.L., MacKay A.A., Vasudevan D. Sorption of ciprofloxacin and oxytetracy-

cline zwitterions to soils and soil minerals: Influence of compound structure // Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. No. 20. P. 7634–7642. doi: 10.1021/es801277y

7. Antilen M., Bustos O., Ramirez G., Canales C., Faundez M., Escudey M., Pizarro C. Electrochemical evaluation of ciprofloxacin adsorption on soil organic matter // New Journal of Chemistry. 2016. V. 40. No. 8. P. 7132–7139. doi: 10.1039/c6nj00207b

8. Terekhova V.A., Fedoseeva E.V., Volkova V.D., Ivanova A.E., Yakimenko O.S. Melanin-containing microorganisms in soils and organic waste // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 204–213 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-204-213

9. Schreiber U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview // Chlorophyll *a* fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in Photosynthesis and respiration / Eds. G. Papageorgiou, Govindjee. Dordrecht: Springer, 2004. P. 279–319. doi: 10.1007/978-1-4020-3218-9_11

10. Matorin D.N., Rubin A.B. Higher plants and algae chlorophyll fluorescence. Moskva-Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2012. 256 p. (in Russian).

11. Liu B.Y., Nie X.P., Liu W.Q., Pauline S., Guan C., Martin T.K.T. Toxic effects of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole on photosynthetic apparatus in *Selenastrum capricornutum* // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2011. V. 74. No. 4. P. 1027–1035. doi: 10.1016/j.ecoenv.2011.01.022

12. Wan L., Wu Y., Zhang B., Yang W., Ding H., Zhang W. Effects of moxiooxacin and gatiooxacin stress on growth, photosynthesis, antioxidant responses, and microcystin release in *Microcystis aeruginosa* // J. Hazard. Mater. 2021. V. 409. Article No. 124518. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124518

13. Cui M., Liu Y., Zhang J. The variation of growth rate, photosynthetic activity, and biodiesel productivity in *Synechocystis* sp. PCC 6803 under antibiotic exposure // BioEnergy Research. 2020. V. 13. P. 955–962. doi: 10.1007/s12155-020-10114-x

14. Martins N., Pereira R., Abrantes N., Pereira J., Gonçalves F., Marques C.R. Ecotoxicological effects of ciprofloxacin on freshwater species: data integration and derivation of toxicity thresholds for risk assessment // Ecotoxicology. 2012. V. 21. P. 1167–1176. doi: 10.1007/s10646-012-0871-x

15. Fu L., Huang T., Wang S., Wang X., Su L., Li C., Zhao Y. Toxicity of 13 different antibiotics towards freshwater green algae *Pseudokirchneriella subcapitata* and their modes of action // Chemosphere. 2016. V. 168. P. 217–222. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.043

16. Robinson A.A., Belden J.B., Lydy M.J. Toxicity of fluoroquinolone antibiotics to aquatic organisms // Environmental Toxicology and Chemistry. 2005. V. 24. No. 2. P. 423–430. doi: 10.1897/04-210R.1

17. Nie X., Wang X., Chen J.U., Zitko V., An T. Response of the freshwater alga *Chlorella vulgaris* to trichloroisocyanuric acid and ciprofloxacin // Environmental Toxicology and Chemistry. 2008. V. 27. No. 1. P. 168–173. doi: 10.1897/07-028.1

Влияние фосфорсодержащих пестицидов на ферментативную активность и множественные формы кислой фосфатазы живородки речной (*Viviparus viviparus* L.)

© 2024. Е. А. Тишина, зав. лабораторией, Т. С. Дроганова, ст. преподаватель, Л. В. Поликарпова, н. с., Н. В. Васильев, д. х. н., профессор, зав. кафедрой, Государственный университет просвещения, 141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, e-mail: ecolab@guppros.ru

Фосфорорганические пестициды применяются в сельском хозяйстве и для обработки ландшафтно-парковых зон вследствие высокой эффективности и экономической доступности. Выявлено изменение активности и состава множественных форм кислой фосфатазы (КФ) гепатопанкреаса (пищеварительной железы) пресноводного моллюска живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) при действии фосфорорганических пестицидов. Глифосат и малатион вызывают увеличение активности фермента в остром токсикологическом эксперименте. Глифосат (нейротропная активность неизвестна) вызывает прирост активности фермента, в 1,5–3,0 раза превышающее его нормальную активность, в то время как малатион (холиномиметик) вызывает увеличение активности КФ в 5–8 раз. Показано, что повышение активности фермента у моллюсков опытных групп связано с появлением новых множественных форм КФ, которые сохраняются на протяжении всего эксперимента. Состав множественных форм фермента у моллюсков контрольной группы на протяжении экспозиции не изменяется. Приведённые данные свидетельствуют о формировании неспецифической адаптации в ответ на действие фосфорорганических пестицидов и подтверждают, что активность КФ гепатопанкреаса живородки речной может являться адекватным индикатором токсического воздействия в эколого-биохимическом мониторинге загрязнений пресных вод.

Ключевые слова: эколого-биохимический мониторинг, гидробионты, живородка речная, токсическое воздействие, глифосат, малатион, ферменты, кислая фосфатаза, множественные формы фермента.

Effect of phosphorus-containing pesticides on the enzymatic activity and multiple forms of acid phosphatase of river snail (*Viviparus viviparus* L.)

© 2024. Е. А. Tishina ORCID: 0000-0001-8329-7855, Т. S. Droganova ORCID: 0000-0002-8917-7392, L. V. Polikarpova ORCID: 0000-0002-5459-3054, N. V. Vasiliev ORCID: 0000-0002-8215-6687, State University of Education, 24, Very Voloshinoy St., Mytischki, Russia, 141014, e-mail: ecolab@guppros.ru

Organophosphate pesticides are used in agriculture and for treating landscape and park areas due to their high efficiency and economic availability, and therefore they are potential toxicants in water bodies. Broad-spectrum systemic herbicide (Glyphosate) and an organophosphorus insecticide (Malathion) have been studied against the freshwater mollusks (*Viviparus viviparus* L.), widespread in permanent water bodies of the European part of Russia and Siberia. Changes in the activity and composition of multiple forms of acid phosphatase (AcP) were revealed in the hepatopancreas of mollusks under the influence of high doses of glyphosate and malathion in an acute toxicological experiment (96 hours). In both cases, an increase in enzyme activity is observed, but the cholinomimetic malathion is significantly more active than glyphosate, the neurotropic activity of which is unknown. It was shown that the increase in activity in the experimental groups of mollusks is associated with the appearance of new multiple forms of acid phosphatase, which persist throughout the experiment. Multiple form of AcP with low relative electrophoretic mobility revealed as an effect of glyphosate and malathion. In addition, in mollusks exposed to malathion, a multiple form of the enzyme with an average electrophoretic mobility was detected. The composition of multiple forms of acid phosphatase in mollusks of the control group did not change during the exposure. The results indicate the formation of nonspecific adaptations in response to organophosphate pesticides and confirm that acid phosphatase can be an indicator of toxic effects in environmental and biochemical monitoring of freshwater pollution.

Keywords: ecological and biochemical monitoring, hydrobionts, river snail, toxic effect, glyphosate, malathion, enzymes, acid phosphatase, multiple forms of the enzyme.

Более 1000 пестицидов, используемых в настоящее время в большинстве стран, непреднамеренно попадают в водные экосистемы через поверхностный сток. Вода является одним из основных средств транспортировки пестицидов с места применения в сельском и лесном хозяйстве в окружающую среду, и водорастворимые экотоксиканты в значительной степени аккумулируются в водных объектах [1].

Фосфорорганические пестициды широко используются в сельском хозяйстве и для обработки ландшафтно-парковых зон, поскольку обладают высокой эффективностью и экономически доступны. В группе распространённых фосфорорганических пестицидов находятся эффективные инсектициды, например, малатион, а также гербицид глифосат, который применяют для борьбы с нежелательной растительностью [2, 3].

Для фосфорорганических инсектицидов хорошо изучен механизм действия, заключающийся в ингибировании холинэстеразы за счёт фосфорилирования серинового остатка эстеразного участка фермента [4]. Результатом такого ингибирования является генерализованное перевозбуждение холинорецепторов под воздействием эндогенного ацетилхолина, что может закончиться гибелью животного. Нервнопаралитический механизм действия имеет общий характер для всех животных, поэтому фосфорорганические инсектициды при их применении против насекомых наносят вред и другим животным. Хотя малатион и не является нормируемым токсикантом, в 2020 г. он был обнаружен в плодовоовощной продукции Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей [5, 6]. Необходимо отметить, что в организме насекомых гидролиз малатиона осуществляется медленно, поэтому преобладают процессы окисления малатиона до малаоксона, который более токсичен, чем малатион [7]. Механизмы преобразования малатиона в организме водных гидробионтов изучены недостаточно.

Глифосат, по-видимому, обладает меньшей опасностью для животных и не является холиномиметиком, его относят к ингибиторам ферментных систем растений [8]. Он ингибирует EPSP-синтазу (5-енолпирувил-шикимат-3-фосфат-синтазу), локализованную в хлоропластах, и блокирует шикиматный путь синтеза бензоидных ароматических соединений [9–11]. Последние годы в связи с активным применением этого гербицида обсуждается вопрос об его возможном канце-

рогенном действии на человека и животных [11–13], однако его действие на гидробионтов мало изучено.

Таким образом, и малатион, и глифосат являются потенциальными токсикантами в водных объектах. Известно, что биотестирование экотоксикантов в водных объектах является одним из наиболее надёжных методов, основанных на оценке воздействия вредного вещества на гидробионтов [14].

В настоящей работе в качестве тест-объекта выбран моллюск живородка речная (*Viviparus viviparus* L.). Этот вид широко распространён в постоянных водоёмах Европейской части России и Сибири [15], его выбор в качестве объекта изучения обусловлен крупными размерами, малой подвижностью, достаточной продолжительностью жизни, высокой плодовитостью и чувствительностью к токсическому воздействию [16, 17]. Для анализа использовался гепатопанкреас (пищеварительная железа), ткани которого чувствительны к токсическому воздействию и являются объектом изучения на других гидробионтах [18, 19]. В качестве индикаторного показателя исследовалась активность кислой фосфатазы (КФ) гепатопанкреаса живородки речной (*V. viviparus* L.) при действии высоких доз фосфорорганических пестицидов глифосата и малатиона.

Фосфатаза является ферментом, сигнализирующим об интенсивности метаболических процессов адаптации. Её чувствительность к токсическому воздействию продемонстрирована для моллюсков *Lymnaea stagnalis* [20], *Crassostrea gigas* и *Modiolus modiolus* [21].

Цель исследования – анализ изменений активности и множественных форм кислой фосфатазы живородки речной (*V. viviparus* L.) при действии высоких доз пестицидов глифосата и малатиона.

Объекты и методы исследования

Сбор животных осуществлялся в Пестовском водохранилище (село Тишково Пушкинского района Московской области, 56°05'11.1" N, 37°44'21.9" E). Акклимацию проводили в течение двух недель в лабораторном аквариуме объёмом 150 л с водными растениями с места сбора моллюсков, в условиях, близких к естественным, с постоянной аэрацией. На протяжении периода акклимации моллюски питались детритом и растениями из аквариума.

В ходе эксперимента моллюсков делили на контрольную и опытные группы. Опытных

животных подвергали воздействию пестицидов в концентрациях, десятикратно превышающих предельно допустимые концентрации для водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{р-х.}) в соответствии с данными, приведёнными в приказе Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (с изменениями на 10 марта 2020 г.): глифосат – 0,01 мг/дм³ (для глифосата ПДК_{р-х.} = 0,001 мг/дм³); малатион – 0,0001 мг/дм³ (для малатиона ПДК_{р-х.} = 0,00001 мг/дм³).

Экспозиция опыта составляла 0, 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72 и 96 ч. Контролем служили животные, отобранные непосредственно перед началом эксперимента (точка экспозиции 0 ч), а также моллюски, содержащиеся в воде без внесения токсиканта. По истечении установленного времени экспозиции отбирали по 6 животных из каждой группы, извлекали пищеварительную железу (гепатопанкреас), из которой получали экстракт водорастворимых белков растиранием при охлаждении с битым кварцевым стеклом. В качестве экстрагента использовали 0,5%-ный раствор Triton X-100 (10-кратный объём по отношению к навеске ткани). Белковые экстракты очищали центрифугированием в рефрижераторной центрифуге «Eppendorf 5417 R» при 6700 g и 4 °C в течение 30 мин, затем отделяли супернатант [16, 22]. Концентрацию белка в полученных экстрактах определяли по методу Лоури [23].

Активность КФ определяли спектрофотометрически по скорости гидролиза модельного субстрата – *n*-нитрофенилфосфата в 0,05 М ацетатном буфере с pH 4,1 (оптимальный для КФ пищеварительной железы живородки речной). Оптическую плотность полученного раствора измеряли на спектрофотометре «Thermo genesis 6» при $\lambda = 415$ нм [24].

За единицу активности (Е) принимали количество фермента, дающее прирост содержания продукта ферментативной реакции (*n*-нитрофенола) на 1 мкмоль за 1 мин. Удельную активность КФ выражали в единицах активности на 1 мг белка (Е/мг белка).

Обнаружение множественных форм КФ живородки речной проводили методом диск-электрофореза в колонках полиакриламидного геля (ПААГ) по Орнштейну и Девису [16, 25, 26].

Электрофорез белков проводили при температуре 4–6 °C (принудительное охлаждение) для предотвращения денатурации белков и сохранения ферментативной активности.

Обнаружение зон нахождения КФ проводили по методике Берстона [27], усовершен-

ствованной в работе [28], модифицированной для гелей. Колонку геля, промытую в дистиллированной воде, помещали в заранее подготовленную инкубационную смесь, составленную из 8 мл 0,2 М ацетатного буфера (pH 4,1) и 1 мл 0,3%-ного раствора α -нафтилфосфата («Sigma», США). После тщательного перемешивания смесь инкубировали в течение 10 мин в термостате при температуре 37 °C. Далее приливали 1 мл раствора прочного синего Б (Fast Blue B, «Chemapol», Чехия), перемешивали и снова инкубировали в термостате (от 5 до 20 мин) до появления малиново-красных полос в местах локализации кислой фосфатазы на гелевой колонке.

Относительную электрофоретическую подвижность (Rf) рассчитывали для каждой выявленной зоны активности КФ как отношение пробега белка к пробегу лидирующего красителя бромфенолового синего.

Все исследования проводили в трёх аналитических повторностях. Результаты представлены в виде «среднее значение \pm стандартное отклонение».

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что активность фермента КФ не остаётся постоянной на протяжении эксперимента, как у контрольной, так и у опытной групп исследованных животных вследствие естественных метаболических процессов в организме моллюсков и имеет фазовый характер, что является отражением процессов индукции и репрессии ферментов.

Воздействие гербицида глифосата (рис. 1) привело к повышению активности КФ относительно контроля практически во всём периоде наблюдения. На протяжении эксперимента выявлено чередование фаз снижения и повышения активности фермента. В первые 12 ч экспозиции отмечено резкое увеличение активности КФ (в 3 раза) относительно контроля. Далее активность фермента несколько снижается, но остаётся выше контрольных значений, а начиная от 48 ч экспозиции и до окончания эксперимента (96 ч), отмечено снижение до значений, близких к контрольным.

Действие инсектицида малатиона (рис. 1) приводит к аналогичному глифосату повышению активности КФ. Однако под действием малатиона проявляется ярко выраженный прирост активности фермента, достигающий максимального значения при 4 ч экспозиции, когда активность кислой фосфатазы возросла

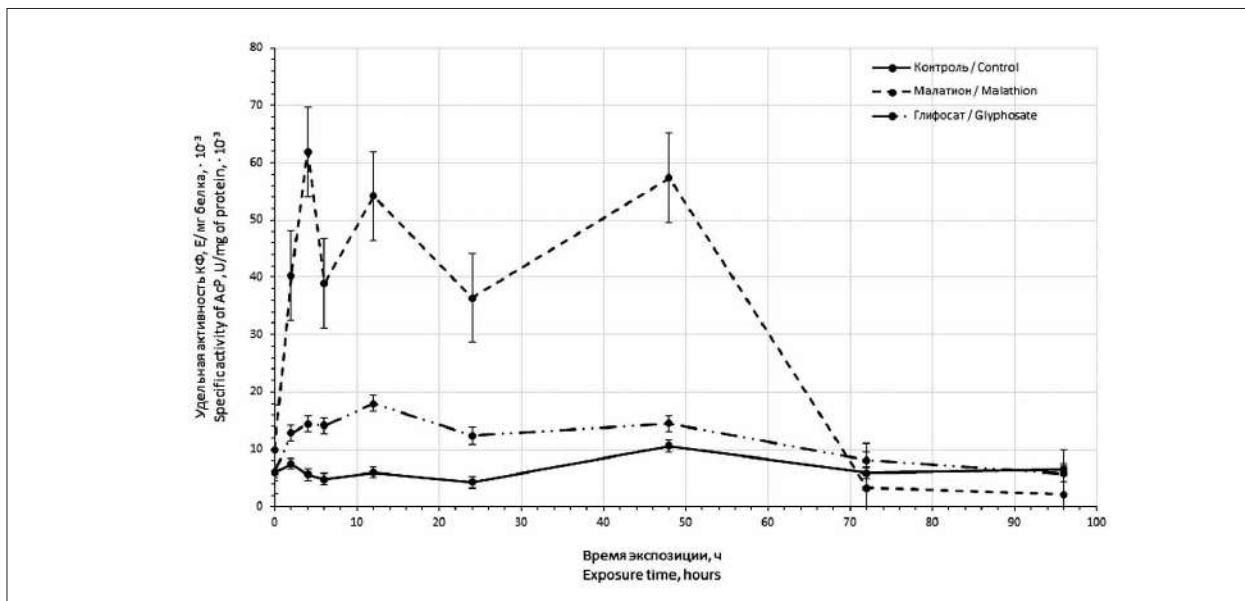


Рис. 1. Изменение удельной активности кислой фосфатазы под действием глифосата и малатиона
 Fig. 1. Changes in specific activity of acid phosphatase (AcP) under the glyphosate and malathion exposure

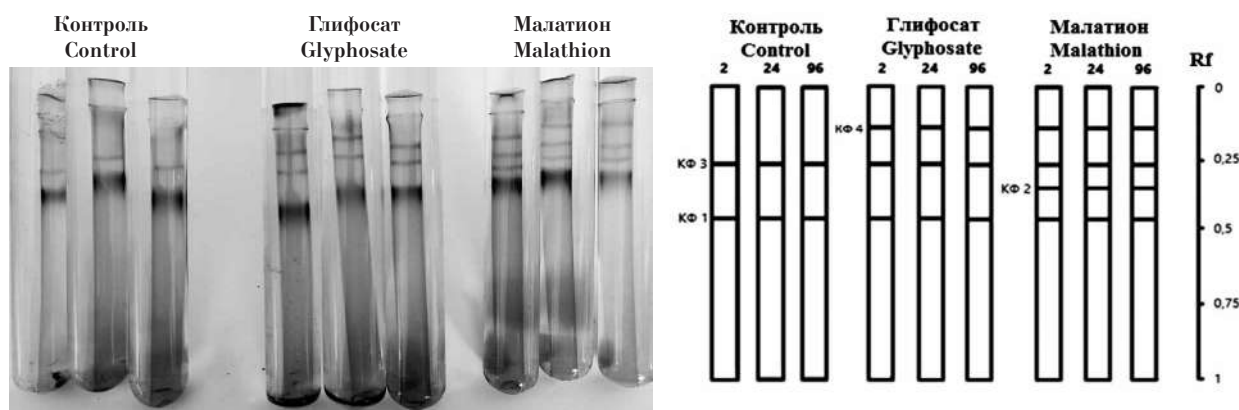


Рис. 2. Фотографии и схемы электрофореграмм множественных форм кислой фосфатазы пищеварительной железы моллюска *Viviparus viviparus* L. в норме и при воздействии токсикантов
 Fig. 2. Photos and diagrams of electrophoregrams of multiple forms of digestive acid phosphatase of the *Viviparus viviparus* L. in control and under toxicants exposure

в 11 раз относительно контроля. Далее до 48 ч экспозиции отмечен фазовый характер изменения активности КФ, но в целом активность фермента в 4–5 раз превышает контрольные значения. Начиная от 48 ч экспозиции активность фермента резко снижается. От 72 до 96 ч экспозиции наблюдается снижение активности фермента до контрольных значений.

Анализ полученных энзимограмм показал, что при общем повышении активности фермента число множественных форм КФ увеличивается (рис. 2). Действие глифосата и малатиона привело к появлению множественной формы КФ с низкой относительной электрофоретической подвижностью ($Rf_{KФ4} = 0,13$), которая сохранялась на протяжении

всего эксперимента. Под воздействием малатиона появляется также дополнительная форма КФ со средним значением электрофоретической подвижности ($Rf_{KФ2} = 0,35$), это может служить объяснением сильного повышения активности фермента КФ. При этом в контрольной группе на протяжении экспозиции состав множественных форм КФ не изменяется. Под воздействием глифосата при экспозиции 2–4 ч, 6–36 ч, 48–96 ч и под воздействием малатиона при экспозиции 2–72 ч и 72–96 ч получены одинаковые спектры фермента.

Проводимые ранее исследования по изменению качественного состава белков при интоксикации фосфорорганическими пести-

цидами выявили образование стресс-белков (металлотионеинов), связанных с увеличением активности КФ [29].

Полученные зависимости активности и характер изменения состава множественных форм КФ соотносятся с фазами развития стресс-реакции (повышение активности ферментов – стадия тревоги, продолжительное сохранение активности фермента выше контрольных значений с последующим снижением до нормы – стадия адаптации) [30], что свидетельствует о выраженной перестройке метаболизма моллюсков и формировании неспецифической адаптации в ответ на токсическое воздействие используемых пестицидов [31, 32]. При анализе литературных источников нами найдено множество примеров, которые подтверждают полученные результаты [33–36] и указывают на изменение активности ферментов, не связанных непосредственно с детоксикацией у гидробионтов.

Заключение

Выявленные зависимости отражают процесс стресс-индуцированной адаптации, состоящей в повышении активности фермента КФ моллюсков, начиная с первых часов токсического воздействия, при сохранении колебательной динамики. Существенные отличия активности от контрольных значений находятся за пределами нормы. Колебания активности в контроле (норме) не превышают двух раз. Влияние глифосата заключается в некотором повышении активности без существенного изменения фазового характера. В то же время влияние малатиона приводит к более выраженному изменению и активности, и амплитуды колебаний. Таким образом, уровень активности и множественные формы КФ являются информативными индикаторами физиологического состояния гидробионтов и могут рассматриваться в качестве биохимического критерия для характеристики токсических свойств водной среды при появлении фосфорорганических пестицидов различных типов.

Литература

1. Волгина Т.Н., Новиков В.Т., Регузова Д.В. Пути распространения пестицидов в объектах окружающей среды // Региональные проблемы. 2010. Т. 13. № 1. С. 76–81.
2. Ганиев М.М., Недорезков В.Д. Химические средства защиты растений. М.: КолосС, 2006. 248 с.
3. Helfrich L.A., Weigmann D.L., Hipkins P., Stinson E.R. Pesticides and aquatic animals: a guide to reducing impacts

on aquatic systems. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015. 24 p.

4. Антохин А.М., Гайнуллина Э.Т., Рыжиков С.Б., Таранченко В.Ф., Яваева Д.К. Холинэстеразы: структура активного центра и механизм влияния блокаторов холинорецепторов на скорость взаимодействия с лигандами // Успехи химии. 2010. Т. 79. № 8. С. 780–795.

5. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 256 с.

6. Киш Л.К., Третьяков А.В., Лаврухина О.И., Амелин В.Г., Гергель М.А., Мищенко Н.В. Продукты трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов в пищевой продукции и продовольственном сырье (аналитический обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 15–25. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-015-025

7. Медведь Л.И. Справочник по пестицидам (гигиена применения и токсикология) / Под ред. академика АМН СССР, профессора Л.И. Медведя. К.: Урожай, 1974. 448 с.

8. Bradberry S.M., Proudfoot A.T., Vale J.A. Glyphosate poisoning // Toxicological Reviews. 2004. V. 23. No. 3. P. 159–167. doi: 10.2165/00139709-200423030-00003

9. Кузнецова Е.М., Чмилъ В.Д. Глифосат: поведение в окружающей среде и уровни остатков // Современные проблемы токсикологии. 2010. № 1. С. 87–95.

10. Плотникова О.М., Кудрин Б.И., Евдокимов А.Н., Максимовских С.Ю. Оценка токсичности глифосата по гематологическим и биохимическим показателям крови лабораторных мышей // Вестник Курганской ГСХА. 2015. № 3. С. 41–44.

11. Benbrook C.M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally // Environ. Sci. Eur. 2016. V. 28. No. 1. Article No. 3. doi: 10.1186/s12302-016-0070-0

12. Cressey D. Widely used herbicide linked to cancer // Nature. 2015 [Электронный ресурс] <https://www.nature.com/articles/nature.2015.17181#citeas> (Дата обращения: 10.01.2024). doi: 10.1038/nature.2015.17181

13. Dos Santos A.P.R., Rocha T.L., Borges C.L., Bailao A.M., Soares C.M.A., Saboia-Morais S.M.T. A glyphosate-based herbicide induces histomorphological and protein expression changes in the liver of the female guppy *Poecilia reticulata* // Chemosphere. 2017. V. 168. P. 933–943. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.116

14. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Кочурова Т.И., Кантор Г.Я. Биоиндикация и биотестирование природных сред как основа экологического контроля на территории зоны защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия // Российский химический журнал. 2007. Т. 51. № 2. С. 59–62.

15. Березкина Г.В., Зотин А.А. Различия в морфологии раковины самцов и самок речных живородок *Viviparus viviparus* (Gastropoda, Viviparidae) // Зоологический

журнал. 2013. Т. 92. № 8. С. 875–881. doi: 10.7868/S0044513413080047

16. Дроганова Т.С., Коничев А.С., Петренко Д.Б., Поликарпова Л.В., Цветков И.Л. Влияние фторида натрия и фторуксусной кислоты на активность кислой ДНКазы, кислой фосфатазы и спектр растворимых белков гепатопанкреаса живородки речной // Вестник Московского Государственного Областного Университета. Сер.: Естественные науки. 2017. № 4. С. 36–45. doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-36

17. Уваева Е.И., Шимкович Е.Д. Биоиндикационное значение популяционных характеристик живородок (Mollusca, Gastropoda, Viviparidae) в водоёмах Центрального Полесья // Ученые записки Казанского университета. Сер.: Естественные науки. 2017. Т. 159. № 3. С. 524–530.

18. Минеев А.К., Минеева О.В. Гистопатологии печени у рыб Саратовского водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 114–119. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-114-119

19. Yancheva V., Velcheva L., Stoyanova S., Georgieva E. Fish in Ecotoxicological Studies // Ecologia Balkanica. 2015. V. 7. No. 1. P. 149–169.

20. Борис О.А., Ильюкова И.И., Шевцова С.Н., Мартынов В.В., Поликарпова Л.В., Дроганова Т.С., Петрова С.Ю., Гомолко Т.Н. Токсические эффекты воздействия отходов гальванических шламов на моллюска *Lymnaea stagnalis* L. // Здоровье и окружающая среда. 2016. № 26. С. 204–206.

21. Сейткалиева А.В., Мензорова Н.И., Рассказов В.А. Фосфатазы двустворчатых моллюсков и иглокожих Японского и Охотского морей // Биология моря. 2015. Т. 41. № 1. С. 46–54.

22. Fafandel M., Bihari N., Perić L., Cenov A. Effect of marine pollutants on the acid DNase activity in the hemocytes and digestive gland of the mussel *Mytilus galloprovincialis* // Aquatic Toxicology. 2008. V. 86. No. 4. P. 508–513. doi: 10.1016/j.aquatox.2007.12.011

23. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. No. 1. P. 265–275. doi: 10.1016/S0021-9258(19)52451-6

24. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of P-Nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // American Journal of Clinical Pathology. 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574. doi: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571

25. Davis B.J. Disc electrophoresis. II. Method and application to human serum proteins // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1964. V. 121. P. 404–427. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14213.x

26. Ornstein L. Disc electrophoresis. I. Background and theory // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1964. V. 121. P. 321–349. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14207.x

27. Берстон М. Гистохимия ферментов. М.: Мир, 1965. 464 с.

28. Лойда З., Госсрау Р., Шиблер Т. Гистохимия ферментов: лабораторные методы / Под ред. Н.Т. Райхлина. М.: Мир, 1982. 272 с.

29. Тишина Е.А., Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В. Влияние фосфорорганических соединений на изменение качественного состава белков пресноводных моллюсков // Трансформация экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов: Материалы международной научной конференции. Киров: ВятГУ, 2019. С. 162–165.

30. Цветков И.Л. Биохимические параметры стресс-редуцирующей реакции гидробионтов при интоксикации: автореф. ... дис. докт. биол. наук. Москва: 2009. 46 с.

31. Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Тишина Е.А. Изменение активности и множественных форм кислой фосфатазы живородки речной под влиянием гербицидов на основе глифосата // Современное состояние водных биоресурсов. Новосибирск: НГАУ, 2019. С. 64–67.

32. Тишина Е.А., Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Коничев А.С. Влияние инсектицидов на основе малатиона на активность кислой фосфатазы живородки речной // Актуальные проблемы биологической и химической экологии. Мытищи: МГОУ, 2019. С. 231–234.

33. Вдовиченко Е.А., Высоцкая Р.У. Сравнительная характеристика активности лизосомальных гликозидаз у щук, обитающих в водоёмах с разным уровнем антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. 2013. Т. 4. № 5. С. 1134–1138.

34. Высоцкая Р.У., Амелина В.С., Бахмет И.Н. Влияние нефтепродуктов на активность лизосомальных ферментов мидий в аквариальных экспериментах // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоёмов Европейского Севера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 123–126.

35. Крупнова М.Ю., Ильмаст Н.В., Немова Н.Н. Активность лизосомальных протеиназ в органах щук (*Esox lucius* L.), отловленных из озёр с различной антропогенной нагрузкой // Труды КарНЦ РАН. Сер.: Экспериментальная биология. 2011. № 3. С. 69–72.

36. Кяйвяряйнен Е.И., Борвинская Е.В., Немова Н.Н., Комов В.Т. Влияние аккумуляции ртути на активность Ca²⁺-активируемых протеиназ в тканях окуней (*Perca fluviatilis* L.) из озёр вблизи биостанции Картеш (Белое море) // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоёмов Европейского Севера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 324–329.

References

1. Volgina T.N., Novikov V.T., Reguzova D.V. Pathways of pesticide distribution in environmental objects // Regional problems. 2010. V. 13. No. 1. P. 76–81 (in Russian).
2. Ganiev M.M., Nedorezkov V.D. Chemical means of plant protection. Moskva: KolosS, 2006. 248 p. (in Russian).
3. Helfrich L.A., Weigmann D.L., Hipkins P., Stinson E.R. Pesticides and aquatic animals: a guide to reducing impacts

- on aquatic systems. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015. 24 p.
4. Antokhin A.M., Gainullina E.T., Ryzhikov S.B., Taranchenko V.F., Yavaeva D.K. Cholinesterase: structure of active centre and mechanism of influence of choline receptor blockers on rate of interaction with ligands // *Uspekhi himii*. 2010. V. 79. No. 8. P. 780–795 (in Russian).
 5. On the State of Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population in the Russian Federation in 2020: State Report. Moskva: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2021. 256 p. (in Russian).
 6. Kish L.K., Tretiakov A.V., Lavrukhina O.I., Ameilin V.G., Gergel M.A., Mishchenko N.V. Transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and raw materials (analytical review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 15–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-015-025
 7. Medved L.I. Handbook on pesticides (hygiene of application and toxicology) / Ed. L.I. Medved. Kiev: Urozhay, 1974. 448 p. (in Russian).
 8. Bradberry S.M., Proudfoot A.T., Vale J.A. Glyphosate poisoning // *Toxicological Reviews*. 2004. V. 23. No. 3. P. 159–167. doi: 10.2165/00139709-200423030-00003
 9. Kuznetsova E.M., Chmil V.D., Glyphosate: environmental fate and levels of residues // *Modern Problems of Toxicology*. 2010. No. 1. P. 87–95 (in Russian)
 10. Plotnikova O.M., Kudrin B.I., Evdokimov A.N., Maksimovskikh S.Yu. The estimation of toxicity glyphosate according to hematological and biochemical parameters of blood of laboratory mice // *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2015. No. 3. P. 41–44 (in Russian).
 11. Benbrook C.M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally // *Environ. Sci. Eur*. 2016. V. 28. No. 1. Article No. 3. doi: 10.1186/s12302-016-0070-0
 12. Cressey D. Widely used herbicide linked to cancer // *Nature*. 2015 [Internet resource] <https://www.nature.com/articles/nature.2015.17181#citeas> (Accessed: 10.01.2024). doi: 10.1038/nature.2015.17181
 13. Dos Santos A.P.R., Rocha T.L., Borges C.L., Bailao A.M., Soares C.M.A., Saboia-Morais S.M.T. A glyphosate-based herbicide induces histomorphological and protein expression changes in the liver of the female guppi *Poecilia reticulata* // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 933–943. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.10.116
 14. Ashikhmina T.Y., Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu., Kochurova T.I., Kantor G.Ya. Bioindication and biotesting of natural environments as the basis of ecological control on the territory of the zone of protective measures of the object on destruction of chemical weapon // *Russian Chemical Journal*. 2007. V. 51. No. 2. P. 59–62 (in Russian)
 15. Berezkina G.V., Zotin A. Differences in the morphology of shells in males and females of the river snail (*Viviparus viviparus*, Gastropoda, Viviparidae) // *Zoologicheskii zhurnal*. 2013. V. 92. P. 875–881 (in Russian). doi: 10.7868/S0044513413080047
 16. Drogonova T.S., Konichev A.S., Petrenko D.B., Polikarpova L.V., Tsvetkov I.L. Influence of sodium fluoride and fluoroacetic acid on the activity of acidic DNase, acid phosphatase and spectrum of soluble proteins of the freshwater snail *Viviparus viviparus* L. // *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural sciences*. 2017. No. 4. P. 36–45 (in Russian). doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-36-45
 17. Uvaeva E.I., Shimkovich E.D. Bioindication significance of the population characteristics of viviparids (*Mollusca, Gastropoda, Viviparidae*) in water bodies of Central Polesia, Ukraine // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. 2017. V. 159. No. 3. P. 521–530 (in Russian).
 18. Mineev A.K., Mineeva O.V. Histopathology of fishes' liver in the Saratov reservoir // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 114–119 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-114-119
 19. Yancheva V., Velcheva I., Stoyanova S., Georgieva E. Fish in ecotoxicological studies // *Ecologia Balkanica*. 2015. V. 7. P. 149–169.
 20. Boris O.A., Ilyukova I.I., Shevtsova S.N., Martynov V.V., Polikarpova L.V., Drogonova T.S., Petrova S.Yu., Gomolko T.N. Toxic effects of slimes waste exposure to shellfish *Lymnaea stagnalis* L. // *Health and Environment*. 2016. No. 26. P. 204–206 (in Russian).
 21. Seitkalieva A.V., Menzorova N.I., Rasskazov V.A. Phosphatases of echinoderm and bivalve mollusks of the Japan and Okhotsk seas // *Marine Biology*. 2015. V. 41. No. 1. P. 46–54 (in Russian).
 22. Fafandel M., Bihari N., Perić L., Cenov A. Effect of marine pollutants on the acid DNase activity in the hemocytes and digestive gland of the mussel *Mytilus galloprovincialis* // *Aquatic Toxicology*. 2008. V. 86. No. 4. P. 508–513. doi: 10.1016/j.aquatox.2007.12.011
 23. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with Folin phenol reagent // *J. Biol. Chem*. 1951. V. 193. No. 1. P. 265–275. doi: 10.1016/S0021-9258(19)52451-6
 24. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of *P*-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // *American Journal of Clinical Pathology*. 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574. doi: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571
 25. Davis B.J. Disc electrophoresis. II. Method and application to human serum proteins // *Ann. N.Y. Acad. Sci*. 1964. V. 121. P. 404–427. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14213.x
 26. Ornstein L. Disc electrophoresis. I. Background and theory // *Ann. N.Y. Acad. Sci*. 1964. V. 121. P. 321–349. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14207.x
 27. Burston M. Enzyme histochemistry. Moskva: Mir, 1965. 464 p. (in Russian).
 28. Loida Z., Gossrau R., Schibler T. Enzyme histochemistry: laboratory methods. Moskva: Mir, 1982. 272 p. (in Russian).

29. Tishina E.A., Drogonova T.S., Polikarpova L.V. Effect of organophosphorus compounds on changes in the qualitative composition of freshwater mollusk proteins // Transformation of ecosystems under the influence of natural and anthropogenic factors: Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Kirov: VyatGU, 2019. P. 162–165 (in Russian).

30. Tsvetkov I.L. Biochemical parameters of stress-reducing reaction of hydrobionts at intoxication: Dr. biol. sci. diss. Abstr. Moskva, 2009. 46 p. (in Russian).

31. Drogonova T.S., Polikarpova L.V., Tishina E.A. Changes in activity and multiple forms of acid phosphatase of river snail under the influence of glyphosate-based herbicides // Current state of aquatic bioresources: Materialy mezhdunarodnoj konferentsii. Novosibirsk: NSAU, 2019. P. 64–67 (in Russian).

32. Tishina E.A., Drogonova T.S., Polikarpova L.V., Konichev A.S. The influence of malathion-based insecticides on the activity of acid phosphatase of the river snail // Current problems of biological and chemical ecology: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoj konferentsii. Mytishi: MSRU, 2019. P. 231–234 (in Russian).

33. Vdovichenko E.A., Vysotskaya R.U. Comparative characteristics of the activity of lysosomal glycosidases

in pikes living in water bodies with different levels of anthropogenic load // Fundamental research. 2013. No. 4–5. P. 1134–1138 (in Russian).

34. Vysotskaya R.U., Amelina V.S., Bakhmet I.N. The influence of petroleum products on the activity of lysosomal enzymes of mussels in aquarium experiments // Biological resources of the White sea and inland waters of European North: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2009. P. 123–126 (in Russian).

35. Krupnova M.Yu., Ilmast N.V., Nemova N.N. Activity of lysosomal proteinases in organs of pike (*Esox lucius* L.) from lakes with different anthropogenic pressure // Transactions of KarRC RAS. Experimental Biology series. 2011. No. 3. P. 69–72 (in Russian).

36. Kyayvyaryaynen E.I., Borvinskaya E.V., Nemova N.N., Komov V.T. Effect of accumulation of mercury on activity Ca²⁺-activated proteinases in tissues of perch (*Perca fluviatilis* L.) From lakes near biological research station Kartesh (White sea) // Biological resources of the White sea and inland waters of European North: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2009. P. 324–329 (in Russian).

Пигментная система нитчатых цианобактерий в условиях аккумуляции ионов свинца

© 2024. А. Р. Гальперина, к. б. н., доцент,
Астраханский государственный технический университет,
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

Изучено влияние растворов $Pb(CH_3COO)_2$ с концентрациями Pb^{2+} , равными 0,02; 0,1; 0,2 и 0,4 мМ, на штамм нитчатой цианобактерии (ЦБ) *Leptolyngbya* sp. SK. Продолжительность экспозиции культуры с растворами составила 21 сутки. В течение эксперимента измеряли убыль Pb^{2+} в растворе; оценивали прирост биомассы ЦБ как показатель адаптации культуры; определяли содержание фотосинтетических пигментов как показатели сохранения жизнеспособности ЦБ. Содержание ионов свинца снизилось во всех вариантах; максимальная убыль (на 96,2%) наблюдалась в растворе с концентрацией Pb^{2+} , равной 0,4 мМ. Увеличение биомассы ЦБ наблюдалось в присутствии всех концентраций Pb^{2+} , максимальный прирост в растворе с концентрацией Pb^{2+} 0,1 мМ – до 7,5 раз. С увеличением концентрации Pb^{2+} в растворе происходило снижение содержания хлорофилла *a* в клетках ЦБ по сравнению с контролем на 67,0–94,2%. Под действием растворов с концентрациями Pb^{2+} 0,02; 0,1 и 0,4 мМ содержание каротиноидов в клетках ЦБ снизилось на 48, 75 и 92% соответственно; при этом концентрация Pb^{2+} 0,2 мМ вызвала увеличение содержания каротиноидов на 1% по сравнению с контролем. Отмечено ингибирующее действие всех исследованных концентраций Pb^{2+} на комплекс фикобилиновых пигментов. Аккумуляция ионов свинца из растворов с концентрациями Pb^{2+} до 0,4 мМ, прирост биомассы ЦБ в присутствии 0,1 мМ Pb^{2+} и повышение синтеза каротиноидов при 0,2 мМ Pb^{2+} могут свидетельствовать об адаптации исследуемой культуры к ацетату свинца.

Ключевые слова: цианобактерии, ионы свинца (II), фотосинтетические пигменты, токсичность.

Pigment system of filamentous cyanobacteria under conditions of accumulation of lead ions

© 2024. A. R. Galperina ORCID: 0000-0002-8486-592X*
Astrakhan state technical university,
16, Tatishcheva St., Astrakhan, Russia, 414056,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

The effect of $Pb(CH_3COO)_2$ solutions with Pb^{2+} concentrations equal to 0.02, 0.1, 0.2 and 0.4 mM to strain of cyanobacteria (CB) *Leptolyngbya* sp. SK was studied. The duration of exposure of the culture with solutions was 21 days. During the experiment, measured the loss of lead ions in the solution; the increase in the biomass of CB was assessed as an indicator of culture adaptation; determined the content of photosynthetic pigments as indicators of maintaining the viability of the culture. The content of lead ions decreased in all variants, the maximum decrease was 96.2% – in the medium with a Pb^{2+} concentration of 0.4 mM. An increase in the biomass of CB was observed in the presence of Pb^{2+} of all concentrations, the maximum increase in a solution with a Pb^{2+} concentration of 0.1 mM was up to 7.5 times. There was a decrease in the content of chlorophyll *a* in the biomass of CB, in comparison with the control, by 67.0–94.2% with an increase in the concentration of Pb^{2+} in the solution. Under the influence of solutions with Pb^{2+} concentrations of 0.02, 0.1, and 0.4 mM, the content of carotenoids in the biomass of cyanobacteria decreased by 48%, 75% and 92%, respectively; the concentration of Pb^{2+} 0.2 mM caused an increase in the content of carotenoids by 1% with the control. The inhibitory effect of all investigated concentrations of Pb^{2+} was noted on the complex of phycobilin pigments. The accumulation of lead ions from solutions with Pb^{2+} concentrations up to 0.4 mM, an increase in CB biomass in the presence of 0.1 mM Pb^{2+} and an increase in the synthesis of carotenoids at 0.2 mM Pb^{2+} may indicate adaptation of the studied culture to lead acetate.

Keywords: cyanobacteria, lead (II) ions, photosynthetic pigments, toxicity.

В настоящее время одними из наиболее серьёзных источников загрязнения окружающей среды являются соли свинца. Загрязнение природных объектов происходит в результате

процесса обжига и плавки свинцовых руд, при сжигании угля, древесины и других органических материалов, включая городские отходы и автомобильное топливо. Свинец не

выполняет биологических функций. Он токсичен, относится к I классу опасности и способен к аккумуляции в цепях питания живых организмов. При этом свинец не разрушается, а способен только перераспределяться между компонентами природной среды [1, 2].

Цианобактерии (ЦБ), являясь прокариотами, обладают способностью быстрого реагирования на внешние воздействия окружающей среды. Их ответные реакции (размеры, морфология, ультраструктура клеток и физиолого-биохимические признаки) могут служить репрезентативными показателями состояния водных и почвенных экосистем [3–7]. Помимо этого, ЦБ участвуют в биоаккумуляции и детоксикации тяжёлых металлов (ТМ) [8]. Многими исследователями отмечено снижение содержания фотосинтетических пигментов в клетках ЦБ под воздействием ТМ [9–11]. Вместе с тем, имеются данные о существенной роли каротиноидных и фикобилиновых пигментов в инактивации ионов ТМ и снижению их токсичности [3, 12].

Несмотря на то, что биология ЦБ находится в последнее время в центре внимания, работы, касающиеся ответа пигментной системы на воздействие ионов свинца, немногочисленны [9, 11, 13]. Поэтому целью работы являлось изучение особенностей пигментной системы нитчатых цианобактерий рода *Leptolyngbya* в условиях аккумуляции ионов свинца.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – штамм нитчатых ЦБ *Leptolyngbya* sp. SK, выделенный из лабораторного цианобактериального сообщества. Культивирование ЦБ проводили на среде BG-11 в колбах Эрленмейера при температуре 20 ± 2 °C и постоянном искусственном освещении 1500 люкс. Свинец вносили в среду в виде ацетата $Pb(CH_3COO)_2$. В эксперименте использовали концентрации свинца 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ/дм³. Контрольными вариантами служили: микроэкосистема с цианобактериальным штаммом, культивируемым на чистой питательной среде и неинокулированная ЦБ питательная среда, содержащая $Pb(CH_3COO)_2$ с концентрациями ионов свинца 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ/дм³. Рост ЦБ контролировали по приросту сырой биомассы. Повторность опыта трёхкратная. Длительность эксперимента составила 21 сутки.

Определение содержания ионов свинца в водной среде проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии [14, 15] со-

гласно ПНД Ф 14.1:2:4.214-06. О поглощающей способности ЦБ судили по снижению концентрации Pb^{2+} в среде, что определяли по формуле:

$$(C_{нач} - C_{кон}) / C_{нач} \cdot 100\%,$$

где $C_{нач}$ – исходная; $C_{кон}$ – конечная концентрация свинца в среде культивирования [16].

Контроль пигментного комплекса ЦБ осуществляли по изменению содержания хлорофилла *a*, каротиноидов и фикобилипротеинов. Содержание фотосинтетических пигментов в клетках исследуемых ЦБ определяли колориметрическим методом. Экстракцию хлорофилла *a* и каротиноидов проводили 70,0% этиловым спиртом [17]. Для определения концентраций пигментов в вытяжке использовали формулы Вернона [18] и Виттштейна [19]. Фикобилипротеиды – фикоцианин, аллофикоцианин и фикоэритрин экстрагировали фосфатным буфером с применением 10-ти кратного замораживания. Концентрацию фикобилипротеинов рассчитывали по формулам Сигелмана и Кайси [20].

Статистический анализ проводили средствами пакета Statistica 6.1 (StatSoft Inc., USA). Данные представляли в виде $x \pm SD$. Для сравнения двух независимых выборок использовали критерий Фишера (при $P \geq 0,95$ различия считали достоверными, предварительно проверив данные на нормальность распределения).

Результаты и обсуждение

Способность ЦБ аккумулировать ионы Pb^{2+} . В ходе исследований отмечено снижение концентрации ионов Pb^{2+} в растворе. Степень извлечения возрастала в зависимости от увеличения исходной концентрации Pb^{2+} : минимальная (51,6%) – в растворе с концентрацией ионов Pb^{2+} 0,02 мМ, максимальная (96,2%) – в растворе с 0,4 мМ. Убыль в абиотическом контроле не превышала 3,2% (рис. 1)

Возрастание степени извлечения ионов металла в зависимости от увеличения концентрации характерно для микроорганизмов, в том числе и для ЦБ. Это связано с постепенным насыщением связей функциональных групп на поверхности микробных клеток [5, 11, 16, 21, 22].

Рост ЦБ в условиях аккумуляции ионов свинца. В микроэкосистемах с концентрациями Pb^{2+} 0,1; 0,2 и 0,4 мМ наблюдалось

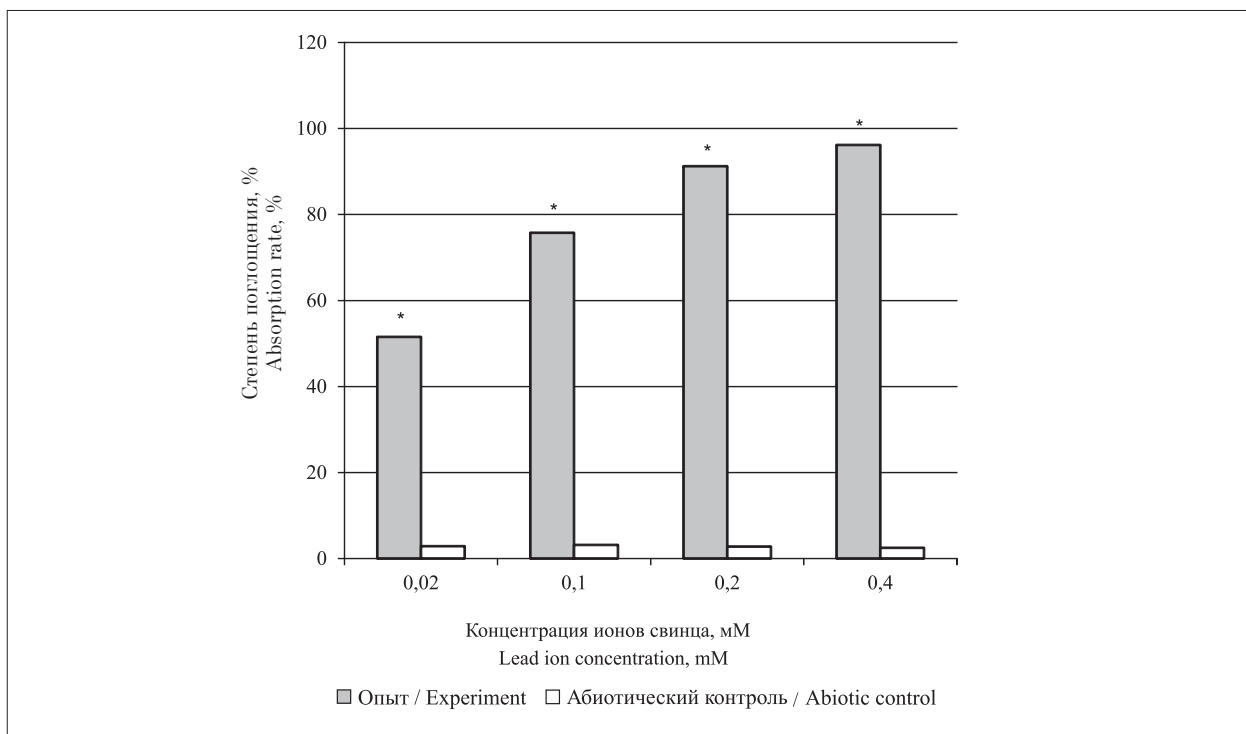


Рис. 1. Степень поглощения свинца цианобактерией. Примечание к рисункам 1–4 и таблицам 1, 2: «*» – результаты, достоверно отличающиеся от абиотического контроля при $P \geq 0,95$
Fig. 1. The rate of absorption of lead by cyanobacteria. Note to Figures 1–4 and Tables 1, 2: “*” – the results are significantly different from abiotic control at $P \geq 0,95$

Таблица 1 / Table 1

Прирост биомассы цианобактерий в эксперименте
 Increase in the biomass of cyanobacteria in the experiment

Концентрация (Pb ²⁺), мМ Concentration (Pb ²⁺), mM	Прирост биомассы, г / Increase in biomass, g
0	0,12±0,01
0,02	0,155±0,008
0,1	1,03±0,05*
0,2	0,845±0,005
0,4	0,545±0,027*

увеличение биомассы по сравнению с контрольной микросистемой. Максимальное накопление биомассы ЦБ до 7,5 раз отмечено в присутствии 0,1 мМ Pb²⁺ (табл. 1).

Увеличение биомассы может быть связано как с непосредственной адсорбцией ионов металла клетками, особенно в растворах с высокими концентрациями Pb(CH₃COO)₂, так и со стимулирующим эффектом низких концентраций ионов ТМ на рост ЦБ. Подобные результаты аналогичны полученным при изучении воздействия ионов свинца и меди в концентрациях 0,5 мг/л для *Spirulina platensis* [11] и воздействия ионов меди и кобальта в концентрациях 0,5 мг/л на *Lyngbya putealis* [12].

Изменение пигментной системы ЦБ в условиях аккумуляции ионов свинца. В экс-

перименте наблюдалось последовательное снижение содержания хлорофилла *a* в биомассе ЦБ под действием возрастающих концентраций ионов свинца в растворе. Минимальное содержание хлорофилла *a* наблюдалось в присутствии 0,4 мМ Pb²⁺ (рис. 2).

Снижение интенсивности фотосинтетических процессов за счёт подавления синтеза хлорофилла *a* является одним из первых признаков интоксикации ТМ. Оно может быть вызвано изменением функциональной структуры тилакоидов: увеличением межтилакоидного пространства и накоплением внутри него частиц металла, образованием мембранных везикул [23–25].

Концентрация каротиноидов в биомассе ЦБ под воздействием Pb²⁺ изменялась неоднозначно. При концентрации Pb²⁺ 0,2 мМ

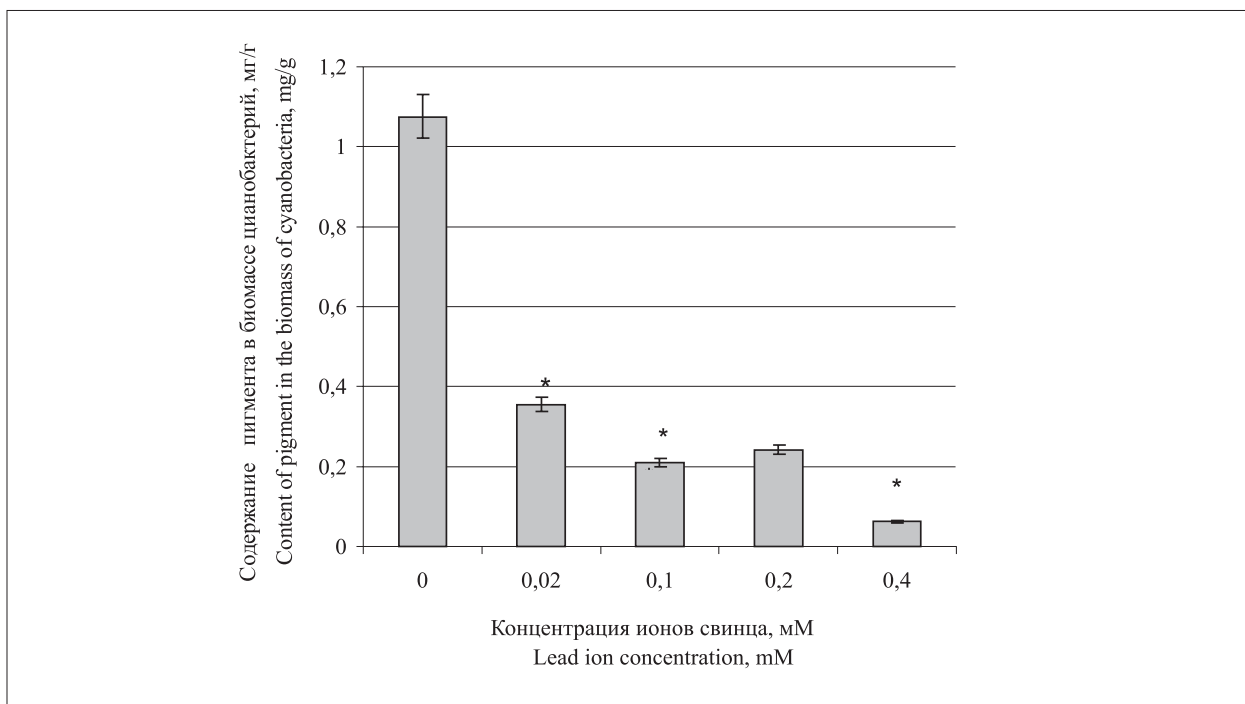


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* в биомассе цианобактерий
Fig. 2. Content of chlorophyll *a* in the biomass of cyanobacteria

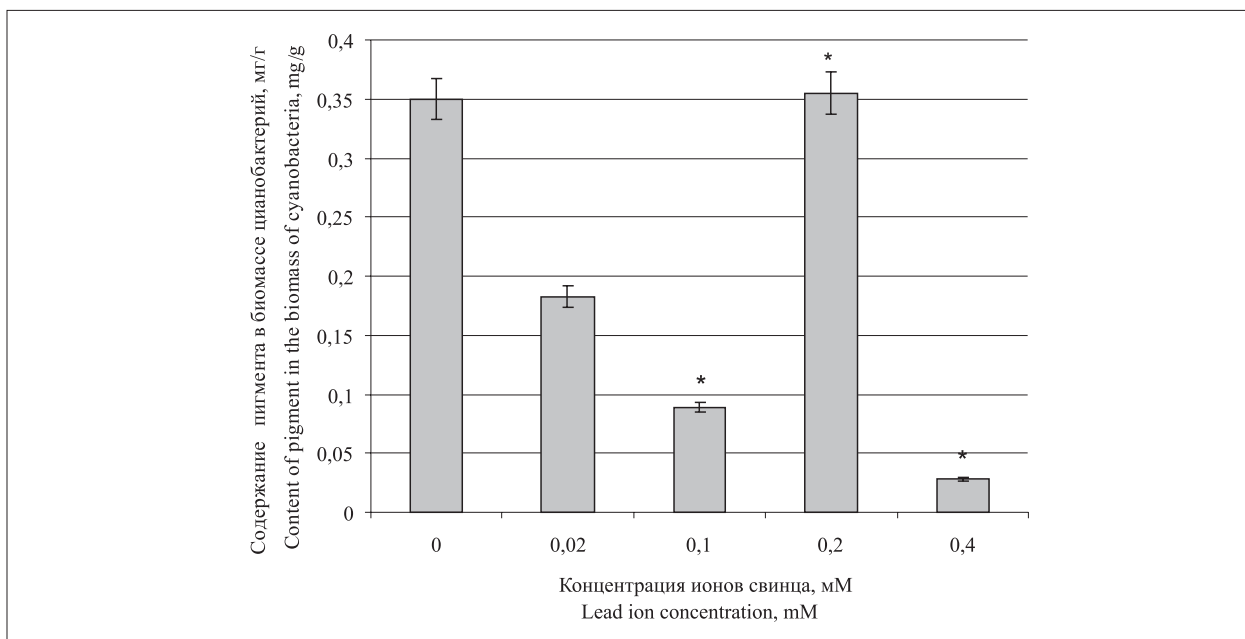


Рис. 3. Содержание каротиноидов в биомассе цианобактерий
Fig. 3. Content of carotenoids in the biomass of cyanobacteria

наблюдалось максимальное увеличение содержания каротиноидов, на 1% превышающее содержание в контрольном варианте (рис. 3).

Поскольку каротиноидные пигменты играют защитную роль в процессах фотосинтеза, предохраняя липидный слой тилакоидных мембран от перекисления, стимуляция их синтеза может свидетельствовать об активации

клеточных процессов детоксикации. Увеличение концентрации каротиноидов наблюдалось при оценке воздействия ионов Co^{2+} и Zn^{2+} на *Anabaena oryzae* [10].

Соотношение суммы каротиноидов и хлорофилла *a* (пигментный индекс) является одной из характеристик физиологического состояния клеток ЦБ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Пигментный индекс штамма *Leptolyngbya* sp. SK при росте на среде с Pb²⁺
 Pigment index of cyanobacteria grown in media with Pb²⁺

Концентрация (Pb ²⁺), мМ / Concentration (Pb ²⁺), mM	Пигментный индекс / Pigment index
0	0,93±0,05
0,02	0,51±0,03
0,1	0,430±0,024*
0,2	1,47±0,11
0,4	0,440±0,025*

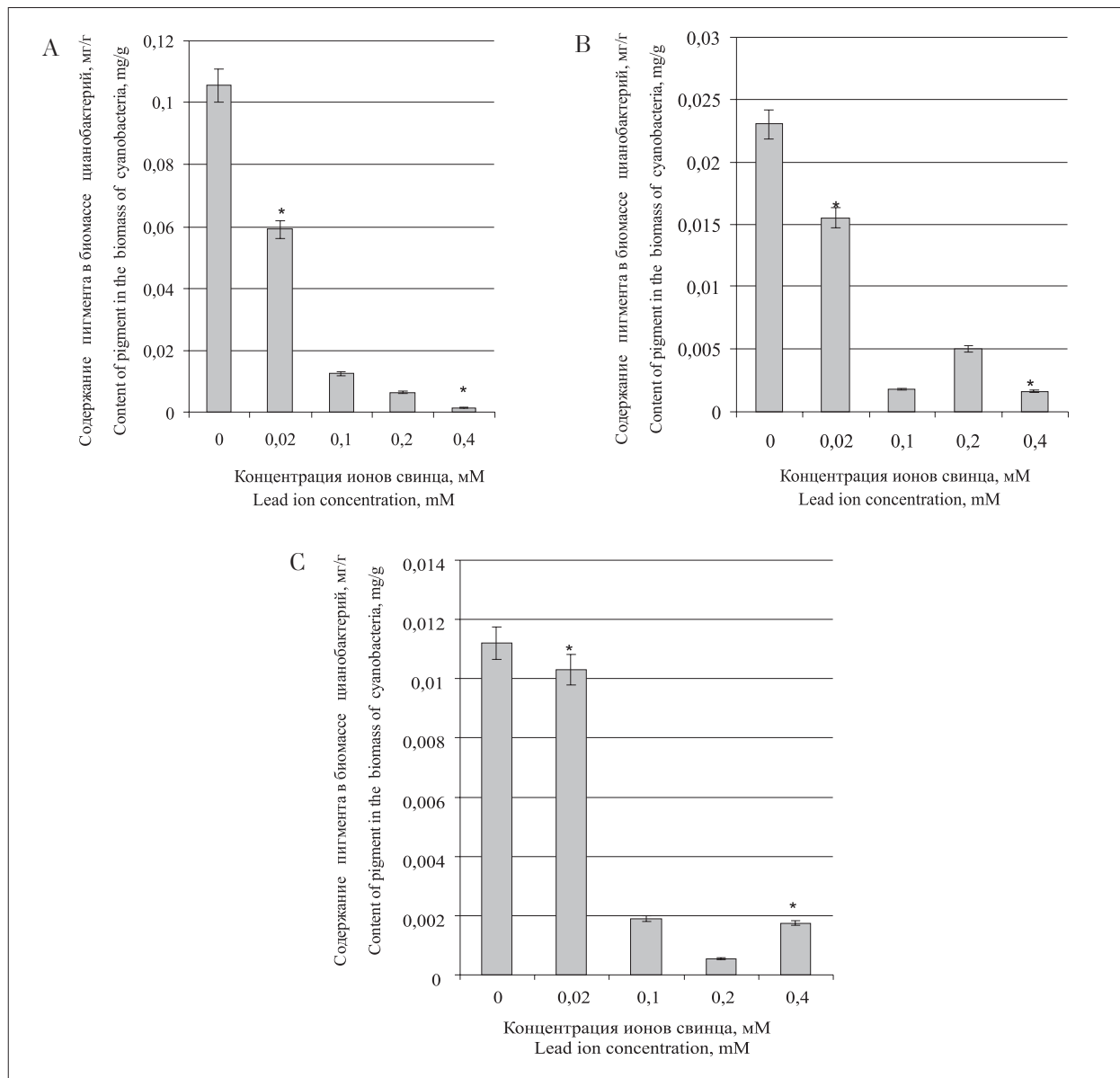


Рис. 4. Содержание фикобилиновых пигментов в биомассе цианобактерий:
 А – фикоцианин, В – аллофикоцианин, С – фикоэритрин
 Fig. 4. Content of phycobilin pigments in the biomass of the cyanobacteria:
 А – phycocyanin, В – allophycocyanin, С – phycoerythrin

Существенное увеличение пигментного индекса под воздействием 0,2 мМ Pb²⁺ может свидетельствовать о низкой фотосинтетической активности клеток ЦБ. Вместе с тем,

повышение значения пигментного индекса за счёт увеличения синтеза каротиноидов демонстрирует наличие механизмов защиты фотосинтетического аппарата [26].

При изучении воздействия Pb^{2+} на комплекс фикобилиновых пигментов отмечено ингибирующее действие всех используемых концентраций (рис. 4А-С).

Снижение концентрации фикобилиновых пигментов указывает на ухудшение передачи световой энергии, собираемой ими и передаваемой далее фотохимически активным молекулам. Это также является одним из свидетельств угнетения процесса фотосинтеза [9, 26].

Заключение

Установлено, что нитчатая ЦБ *Leptolyngbya* sp. SK способна аккумулировать Pb^{2+} из растворов с концентрациями 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ. Максимальное извлечение наблюдалось из растворов с концентрацией Pb^{2+} 0,4 мМ (до 96%), превосходя абиотический контроль в 30 раз.

Некоторые концентрации Pb^{2+} в растворе способствовали приросту биомассы: при концентрации 0,1 мМ Pb^{2+} биомасса выросла в 7,5 раз.

С увеличением содержания Pb^{2+} наблюдалось последовательное снижение содержания хлорофилла *a* и фикобилиновых пигментов. При этом угнетение синтеза каротиноидов происходило менее интенсивно; в присутствии 0,2 мМ Pb^{2+} наблюдалась слабая стимуляция (до 1%).

Существенный прирост биомассы ЦБ в присутствии 0,1 мМ Pb^{2+} и повышение синтеза каротиноидов при 0,2 мМ Pb^{2+} могут свидетельствовать об адаптации исследуемой культуры к ацетату свинца.

Исследования проведены за счёт средств на выполнение государственного задания в рамках НИОКР «Микроорганизмы аридных зон как основа экобиотехнологий для оздоровления экосистем Нижнего Поволжья» (№ 124041100137-2).

Литература

1. Пищик В.Н., Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Хомяков Ю.В. Механизмы адаптации микроорганизмов в растительно-микробных системах к тяжёлым металлам // Микробиология. 2016. Т. 85. № 3. С. 231–247. doi: 10.7868/S0026365616030113
2. Розанов Л.Л. Геоэкологические процессы в окружающей среде: методологический аспект // Вестник Московского государственного областного университета. Серия Естественные науки. 2017. № 2. С. 71–80. doi: 10.18384/2310-7189-2017-24-71-80
3. Bekasova O.D., Brekhovskikh A.A., Moskvina M.I. Participation of extracellular polysaccharides in detoxica-

tion of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum* // Biophysics. 2002. V. 47. No. 3. P. 515–523.

4. Shilpi G., Sunita S., Sweta S. Hexavalent chromium toxicity to cyanobacterium *Spirulina platensis* // International Research Journal of Pharmacy. 2014. V. 5. No. 12. P. 910–914. doi: 10.1109/ASENSE.2003.1225018

5. Фокина А.И., Горностаева Е.А., Огородникова С.Ю., Зыкова Ю.Н., Домрачева Л.И., Кондакова Л.В. Адаптационные резервы почвенных биопленок с доминированием цианобактерий рода *Phormidium* // Сибирский экологический журнал. 2015. Т. 22. № 6. С. 842–851. doi: 10.15372/SEJ2015060

6. Фокина А.И., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И., Лялина Е.И., Горностаева Е.А., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Цианобактерии как тест-организмы и биосорбенты // Почвоведение. 2017. № 1. С. 77–85. doi: 10.7868/S0032180X16110034

7. Фокина А.И., Лялина Е.И., Трефилова Л.В., Ашихмина Т.Я. Отклик почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* на действие сульфата меди(II) в присутствии глутатиона восстановленного // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 102–108. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-101-108

8. Dubey S.K., Mehra J.S., Tiwari P., Bishwas A.J. Potential use cyanobacterial species in bioremediation of industrial effluents // African Journal of Biotechnology. 2011. V. 10. No. 7. P. 1125–1132. doi: 10.3389/ajpls.2016.00303

9. Arunakumara K.K.I.U., Zhang Xuecheng. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae // Oceanic and Coastal Sea Research. 2008. V. 7. No. 1. P. 60–64. doi: 10.1007/s11802-008-0060-y

10. Chakilam S.R. Metal effects on carotenoid content of cyanobacteria // International Journal of Botany. 2012. V. 8. No. 4. P. 192–197. doi: 10.3923/ijb.2012.192.197

11. El-Din S.M. Effect of copper and lead on growth and some metabolic activities of cyanobacterium *Spirulina platensis* (Nordstedt) // Egyptian Journal of Botany. 2017. V. 57. No. 3. P. 445–456. doi: 10.21608/ejbo.2017.822.1055

12. Kiran B., Thanasekaran K. Metal tolerance of an indigenous cyanobacterial strain, *Lyngbya putealis* // International Biodeterioration & Biodegradation. 2011. V. 65. No. 8. P. 1128–1132. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.08.011

13. Hemlata F.T. Screening of cyanobacteria for phycolipids and effect of different environmental stress on its yield // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. V. 83. No. 4. P. 509–513. doi: 10.1007/s00128-009-9837y

14. Прайс В. Аналитическая спектрометрия атомно-абсорбционная. М.: Мир, 1976. 355 с.

15. Брицке М.Э. Атомно-адсорбционный спектрально-химический анализ. М.: Химия, 1982. 223 с.

16. Литвиненко Л.В. Способность актинобактерий родов *Dietzia*, *Gordonia* и *Rhodococcus* аккумулировать ионы никеля // Микробиология. 2019. Т. 88. № 2. С. 207–216. doi: 10.1134/S002636561902006X

17. Сиренко Л.А. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. Киев: Наукова думка. 1975. 247 с.
18. Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Analytical Chemistry. 1960. V. 32. P. 1144–1150.
19. Wettstein P. Von Chromofyll – letal und der submicroscopische Form wechsel der Plastiden // Experimental Cell Research. 1957. V. 12. P. 427–431.
20. Siegelman H.W., Kycia H.J. Algal biliproteins // Handbook of Phycological Methods / Eds. J.A. Hellebust, J.S. Craigie. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. P. 71–79.
21. Abdel-Aty M., Hassan Y., Al-Ghamdi A. Real-time prediction of visibility related crashes // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. V. 24. P. 288–298. doi: 10.1016/j.trc.2012.04.001
22. Al-Homaidan A.A., Alabdullatif J.A., Al-Hazzani A.A., Al-Ghanayem A.A., Alabbad A.F. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass // Saudi Journal of Biological Sciences. 2015. V. 22. No. 6. P. 795–800. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.06.010
23. Heng L.Y., Jusoh K., Mui Ling., Idris M. Toxicity of single and combinations of lead and cadmium to the cyanobacteria *Anabaena flos-aquae* // Bulletin Environmental Contamination and Toxicology. 2004. V. 72. P. 373–379 doi: 10.1007/s00128-003-8923-9
24. Wong L.S., Lee Y.H., Surif S. Fluorometric response of cyanobacteria to the combination of heavy metals // Int'l Conf. on Advances in Environment, Agriculture & Medical Sciences (ICAEM'14). Kuala Lumpur (Malaysia), 2014. P. 7–9. doi: 0.17758/IAAST.A1114051
25. Deep P.R., Bhattacharyya S., Nayak B. Effect on biochemical parameters of cyanobacterium *Anabaena* sp. under lead stress // International Journal of Advanced Research. 2016. V. 4. No. 9. P. 2114–2129. doi: 10.21474/IJAR01/1697
26. Mulders K.J.M., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // Journal of Phycolgy. 2014. V. 50. P. 229–242. doi: 10.1111/jpy.12173
27. Yruela I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions // Functional Plant Biology. 2009. V. 36. No. 5. P. 409–410. doi: 10.1071/FP08288
3. Bekasova O.D., Brekhovskikh A.A., Moskvina M.I. Participation of extracellular polysaccharides in detoxication of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum* // Biophysics. 2002. V. 47. No. 3. P. 515–523.
4. Shilpi G., Sunita S., Sweta S. Hexavalent chromium toxicity to cyanobacterium *Spirulina platensis* // International Research Journal of Pharmacy. 2014. V. 5. No. 12. P. 910–914. doi: 10.1109/ASENSE.2003.1225018
5. Fokina A.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N., Domracheva L.I., Kondakova L.V. Adaptation reserves of soil biofilms with dominance of cyanobacteria of the genus *Phormidium* // Contemporary Problems of Ecology. 2015. V. 22. No. 6. P. 842–851 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ2015060
6. Fokina A.I., Ogorodnikova S.Yu., Domracheva L.I., Lyalina E.I., Gornostaeva E.A., Ashihmina T.Ya., Kondakova L.V. Cyanobacteria as test-organisms and biosorbents // Pochvovedenie. 2017. V. 1. P. 77–85 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16110034
7. Fokina A.I., Lyalina E.I., Trefilova L.V., Ashihmina T.Ya. The response of soil cyanobacteria *Nostoc paludosum* to the effect of copper(II) sulfate in the presence of the restored glutathione // Theoretical and Applied Ecology. 2019. V. 3. P. 102–108 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-101-108
8. Dubey S.K., Mehra J.S., Tiwari P., Bishwas A.J. Potential use cyanobacterial species in bioremediation of industrial effluents // African Journal of Biotechnology. 2011. V. 10. No. 7. P. 1125–1132. doi: 10.3389/fpls.2016.00303
9. Arunakumara K.K.I.U., Zhang Xuecheng. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae // Oceanic and Coastal Sea Research. 2008. V. 7. No. 1. P. 60–64. doi: 10.1007/s11802-008-0060-y
10. Chakilam S.R. Metal effects on carotenoid content of cyanobacteria // International Journal of Botany. 2012. V. 8. No. 4. P. 192–197. doi: 10.3923/ijb.2012.192.197
11. El-Din S.M. Effect of copper and lead on growth and some metabolic activities of cyanobacterium *Spirulina platensis* (Nordstedt) // Egyptian Journal of Botany. 2017. V. 57. No. 3. P. 445–456. doi: 10.21608/ejbo.2017.822.1055
12. Kiran B., Thanasekaran K. Metal tolerance of an indigenous cyanobacterial strain, *Lyngbya putealis* // International Biodeterioration & Biodegradation. 2011. V. 65. No. 8. P. 1128–1132. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.08.011
13. Hemlata F.T. Screening of cyanobacteria for phycobiliproteins and effect of different environmental stress on its yield // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. V. 83. No. 4. P. 509–513. doi: 10.1007/s00128-009-9837-y
14. Prays V. Analytical spectrometry atomic absorption. Moskva: Mir, 1976. 355 p. (in Russian).
15. Britske M.E. Atomic adsorption spectrochemical analysis. Moskva: Khimiya, 1982. 223 p. (in Russian).
16. Litvinenko L.V. Ability of the *Dietzia*, *Ghordonia* and *Rhodococcus* actinobacteria to accumulate nickel

References

1. Pischik V.N., Vorobev N.I., Provorov N.A., Khomyakov Yu.V. Mechanisms of plant and microbial adaptation to heavy metals in plant – microbial systems // Microbiologia. 2016. V. 85. No. 3. P. 231–247 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365616030113
2. Rozanov L.L. Geocological processes in the environment: methodology aspect // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki. 2017. V. 2. P. 71–80 (in Russian). doi: 10.18384/2310-7189-2017-2-71-80

- ions // Microbiology. 2019. V. 88. No. 2. P. 207–216 (in Russian). doi: 10.1134/S002636561902006X
17. Sirenko L.A. Methods of physiological and biochemical research of algae in hydrobiological practice. Kyiv: Naukova Dumka, 1975. 247 p. (in Russian).
18. Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Analytical Chemistry. 1960. V. 32. P. 1144–1150.
19. Wettstein P. Von Chrofyll – letal und der submicroscopische Form wechsel der Plastiden // Experimental Cell Research. 1957. V. 12. P. 427–431.
20. Siegelman H.W., Kycia H.J. Algal biliproteins // Handbook of Phycological Methods / Eds. J.A. Hellebust, J.S. Craigie. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. P. 71–79.
21. Abdel-Aty M., Hassan Y., Al-Ghamdi A. Real-time prediction of visibility related crashes // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. V. 24. P. 288–298. doi: 10.1016/j.trc.2012.04.001
22. Al-Homaidan A.A., Alabdullatif J.A., Al-Hazzani A.A., Al-Ghanayem A.A., Alabbad A.F. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass // Saudi Journal of Biological Sciences. 2015. V. 22. No. 6. P. 795–800. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.06.010
23. Heng L.Y., Jusoh K., Mui Ling., Idris M. Toxicity of single and combinations of lead and cadmium to the cyanobacteria *Anabaena flos-aquae* // Bulletin Environmental Contamination and Toxicology. 2004. V. 72. P. 373–379. doi: 10.1007/s00128-003-8923-9
24. Wong L.S., Lee Y.H., Surif S. Fluorometric response of cyanobacteria to the combination of heavy metals // Int'l Conf. on Advances in Environment, Agriculture & Medical Sciences (ICAEAM'14). Kuala Lumpur (Malaysia), 2014. P. 7–9. doi: 0.17758/IAAST.A1114051
25. Deep P.R., Bhattacharyya S., Nayak B. Effect on biochemical parameters of cyanobacterium *Anabaena* sp. under lead stress // International Journal of Advanced Research. 2016. V. 4. No. 9. P. 2114–2129. doi: 10.21474/IJAR01/1697
26. Mulders K.J.M., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // Journal of Phycology. 2014. V. 50. P. 229–242. doi: 10.1111/jpy.12173
27. Yruela I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions // Functional Plant Biology. 2009. V. 36. No. 5. P. 409–410. doi: 10.1071/FP08288

Цитогенетические последствия воздействия бензина на *Lepidium sativum* L.

© 2024. Л. С. Тупицына, к. б. н., доцент, Е. О. Волкова, магистр, С. С. Тупицын, к. б. н., доцент, З. В. Шейкина, ассистент, Тюменский государственный университет, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6, e-mail: s.s.tupicyn@utmn.ru

Цель исследования заключалась в характеристике экологических последствий воздействия бензина на биологические объекты. На сегодняшний день нефть и продукты её переработки остаются одними из самых распространённых поллютантов. Новизна и актуальность работы определяется минимальной базой данных, касающихся цитогенетических изменений в результате воздействия бензина на биоту. Регистрация подобных экологических последствий, как правило, негативных, диктует необходимость разработки направлений и методов рекультивации загрязнённых территорий.

Последствия действия бензина были выявлены в эксперименте с модельным растительным объектом – кресс-салатом (*Lepidium sativum* L.). Было изучено воздействие бензина АИ-95 в концентрациях 3, 5, 10% (водный раствор). Для цитогенетического анализа просмотрены временные давленные микропрепараты срезов корешков, окрашенные ацетоорсеином. Для учёта хромосомных нарушений использован анафазный метод.

По результатам исследования бензин можно охарактеризовать как мутаген: уровень мутаций (мосты, фрагменты, микроядра) при действии бензина в концентрации 5 % выше, чем в контроле, в 35 раз. Множественные нарушения зарегистрированы только в результате воздействия исследуемого поллютанта, который также детерминирует резкое увеличение частоты микроядер. Доля aberrantных анафаз от числа общего числа анафаз в контроле составила 1,2%, в опытных вариантах повышается до 42,0, 68,4 и 79,6% при действии бензина в концентрациях 3, 5 и 10% соответственно.

Зарегистрирована митотоксическая, а также цитотоксическая активность, проявляющаяся в понижении митотического индекса и изменении соотношения фаз митоза. В опытных вариантах понижена частота клеток в анафазе и увеличена доля клеток на стадии профазы, что может быть обусловлено увеличением времени работы систем репарации. Новые экспериментальные данные по генотоксичности бензина пополняют информационную базу данных о негативных последствиях воздействия бензина на растительные объекты.

Ключевые слова: хромосомные аномалии, митотический индекс, фазы митоза, *Lepidium sativum* L., экотоксичность бензина.

Cytogenetic aftermath by gasoline impact on *Lepidium sativum* L.

© 2024. L. S. Tupicyna ORCID: 0000-0001-9544-3418, E. O. Volkova ORCID: 0000-0003-2220-367X, S. S. Tupitsin ORCID: 0000-0001-5986-3669, Z. V. Shejkina ORCID: 0000-0003-1483-739X, Tyumen State University, 6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003, e-mail: s.s.tupicyn@utmn.ru

The study aimed to characterize the ecological aftermath of the impact of gasoline on biological objects. On today, oil and products from it remain one of the most common pollutants. The novelty and relevance of the study are determined by the minimum database of cytogenetic changes after impact of gasoline on biota. The registration of such consequences, as a rule, negative ones, dictates the need to develop directions and methods for the reclamation of contaminated areas.

An experimental study using a model plant object – watercress (*Lepidium sativum* L.) revealed the aftermath of gasoline impact. This object made it possible to identify a complex of changes determined by the gasoline. The experiment studied the effect of AI-95 gasoline in concentrations of 3, 5, 10% (water solution). For cytogenetic analysis, temporary compressed micro preparations of root sections stained with acetoorcein were examined. The anaphase method was used to account the chromosomal abnormalities.

Gasoline can also be characterized as a mutagen. The level of mutations (bridges, fragments, micronucleus) under the impact of gasoline at a concentration of 5% is 35 times higher than in the control. Multiple violations were registered only as a result of impact by the investigated pollutant, which determines a high increase in the frequency of micronucleus.

The proportion of aberrant anaphases in the total number of anaphases in the control was 1,2%, in the experimental variants it increased to 42,0, 68,4 and 79,6% under the impact of gasoline at concentrations of 3, 5 and 10%.

Mitotoxic, as well as cytotoxic activity, was recorded. It is shown in a decrease in the mitotic index and a change in the ratio of mitotic phases. In the experimental variants, the frequency of cells in anaphase is decreased and the proportion of cells at the prophase stage is increased. That may be due to increase repair systems operating time. New experimental data on the genotoxicity of gasoline replenish the information database on the negative consequences of the impact of gasoline on plant objects.

Keywords: chromosomal abnormalities, mitotic index, phases of mitosis, *Lepidium sativum* L., ecotoxicity of gasoline.

Очевидная и широко обсуждаемая экологическая проблема сегодня – существование организмов в антропогенно изменённой среде обитания. Поэтому усилия исследователей направлены на регистрацию уровня загрязнения биосферы и, в связи с этим, характеристику изменений её обитателей. Такого рода изменения фиксируют на разных уровнях организации живого, изучая разнообразные признаки: морфологические, физиологические, поведенческие и т.п. Популярными являются исследования, связанные с оценкой генетических последствий воздействия окружающей среды. Последнее направление реализуется, в частности, через генетический скрининг различных природных образцов (воды, почвы, донных отложений и т. п.) и отдельных экологических факторов разной природы (физических, химических, биологических) и происхождения [1–5].

Одним из самых распространённых загрязнителей на сегодняшний день являются нефть и продукты её переработки, в частности, бензин. Источником бензина в окружающей среде являются, например, автозаправочные станции, в зоне которых загрязнитель распространяется во всех средах жизни.

Цель нашего исследования заключалась в характеристике генотоксических последствий воздействия бензина на растительный модельный объект *Lepidium sativum* L.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели было выполнено лабораторное исследование, результаты которого позволили оценить такие параметры, как: частота хромосомных aberrаций, митотическая активность, соотношение фаз митоза.

В работе были изучены последствия воздействия бензина АИ-95, который использовали в 3 концентрациях: 3, 5 и 10% (водный раствор). Модельным объектом выбран кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта «Дукат».

Семена салата (n = 800) проращивали в чашках Петри (25 чашек по 30 семян и 2 чашки по 25 семян) на фильтровальной

бумаге в течение 72 ч. Каждую чашку Петри накрывали мерными стаканами объёмом 1000 мл.

Для цитогенетического анализа готовили временные давленные препараты срезов корешков растений, окрашенные ацетоорсеином. Для анализа был использован анафазный метод согласно стандартной технологии [6, 7]. Приготовленные микропрепараты просматривали под микроскопом при увеличении $\times 100$. Подсчитывали число делящихся клеток, выделяли нормальные и аномальные митозы.

Статистическую достоверность различий средних значений оценивали с помощью t-критерия Стьюдента, распределений частот – χ^2 ($p = 0,95$).

Результаты и обсуждение

Результаты цитогенетического анализа позволили сделать вывод о генотоксичности бензина для кресс-салата. Прямой пропорциональной зависимости от концентрации бензина при этом не выявлено. И в контроле, и в опытных вариантах зарегистрированы такие аномалии как: одиночные и множественные мосты, фрагменты, микроядра. Клетки с комплексными нарушениями обнаружены только при действии бензина. Суммарная частота aberrаций при воздействии бензина в концентрации 5% в 35 раз выше контрольных значений (табл., рис. 1 и 2). Доля aberrантных анафаз (от общего числа анафаз) в контроле равна 1,2%, в опытных повышается до 42,0, 68,4 и 79,6% при воздействии бензина в концентрациях 3, 5 и 10% соответственно.

Доля клеток в разных фазах митоза при воздействии бензина статистически достоверно отличается от аналогичного в контрольном варианте: уменьшается (почти в 2 раза) доля анафаз, частота профаз при этом увеличивается (рис. 3).

Митотическая активность при действии бензина резко (статистически достоверно) уменьшается (рис. 4). Величина митотического индекса тем меньше, чем выше концентрация исследуемого нефтепродукта.

Таблица / Table

Частота различных хромосомных aberrаций в клетках корневого чехлика кресс-салата при воздействии бензина в разных концентрациях (%) / Frequency of various chromosomal aberrations in the watercress root cap cells exposed by gasoline (%)

Хромосомные нарушения Chromosomal abnormalities	Концентрации бензина, % / Gasoline concentrations, %			
	0	3	5	10
Множественные мосты Multiple bridges	0,13±0,02	1,74±0,01* <i>I</i>	3,73±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	2,38±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Одиночные мосты Single bridges	0,13±0,01	4,85±0,02* <i>I</i>	3,73±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	2,38±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Фрагменты / Fragments	0,05±0,01	2,55±0,01* <i>I</i>	1,63±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	1,60±0,01* <i>№</i> <i>i</i>
Микроядра / Micronucleus	0,02±0,01	1,88±0,01* <i>I</i>	2,92±0,01* <i>№</i> <i>i</i>	1,97±0,01* <i>№</i> <i>I</i>
Комплексные aberrации Complex aberrations	0,00±0,01	0,34±0,01* <i>I</i>	0,55±0,02* <i>№</i> <i>i</i>	0,60±0,03* <i>№</i> <i>i</i>
Число просмотренных клеток одного растения / The number of cells viewed per plant				
Число / Number	2058–2820	1799–2320	1256–1892	1090–1609

Примечание: * – ($p < 0,001$) – статистически достоверные различия с контрольным вариантом; *№* – с 1 опытным вариантом (3%); *I* – со 2 опытным вариантом (5%); *i* – с 3 опытным вариантом (10%).

Note: * – ($p < 0,001$) – statistically significant differences with the control option; *№* – with 1 experimental variant (3%); *I* – with 2 experimental variant (5%); *i* – with 3 experimental variant (10%).

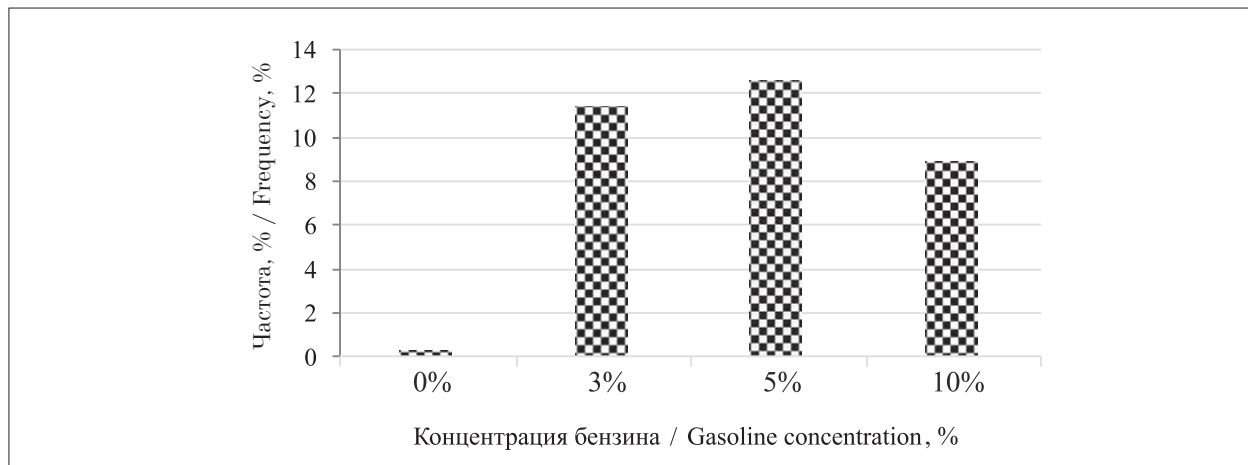


Рис. 1. Суммарная частота хромосомных нарушений в клетках корневого чехлика кресс-салата при разных концентрациях бензина
Fig. 1. The total frequency of abnormalities in the watercress root cap cells at different gasoline concentrations

Таким образом, генетический скрининг с использованием растительного объекта позволил сделать вывод о мутагенных свойствах бензина.

Ряд авторов при этом указывает на одновременный цитогенетический эффект, проявляющийся в изменении пролиферативной активности и изменении соотношения доли клеток в разных фазах митоза [8]. В случае воздействия бензина АИ-95 даже в минимальной (3%) из используемых концентраций митотический индекс существенно снижается. Исследуемый поллютант определяет не только увеличение продолжительности интерфазы, но и профазы, что интерпретируют как воз-

можность увеличения времени работы систем генетической репарации [9, 10].

Экспериментально доказано увеличение скорости включения H^3 -тимидина как показателя усиления репаративного синтеза и C^{14} -лейцина, сигнализирующего об активном замещении или восстановлении повреждённых белков в условиях техногенного загрязнения [10]. Но следует указать, что ионы свинца, например, детерминируют понижение продолжительности профаз (как и анафаз), что связывают с нарушением процесса сборки микротрубочек [11].

Данные по анализу цитогенетических нарушений в соматических клетках растений

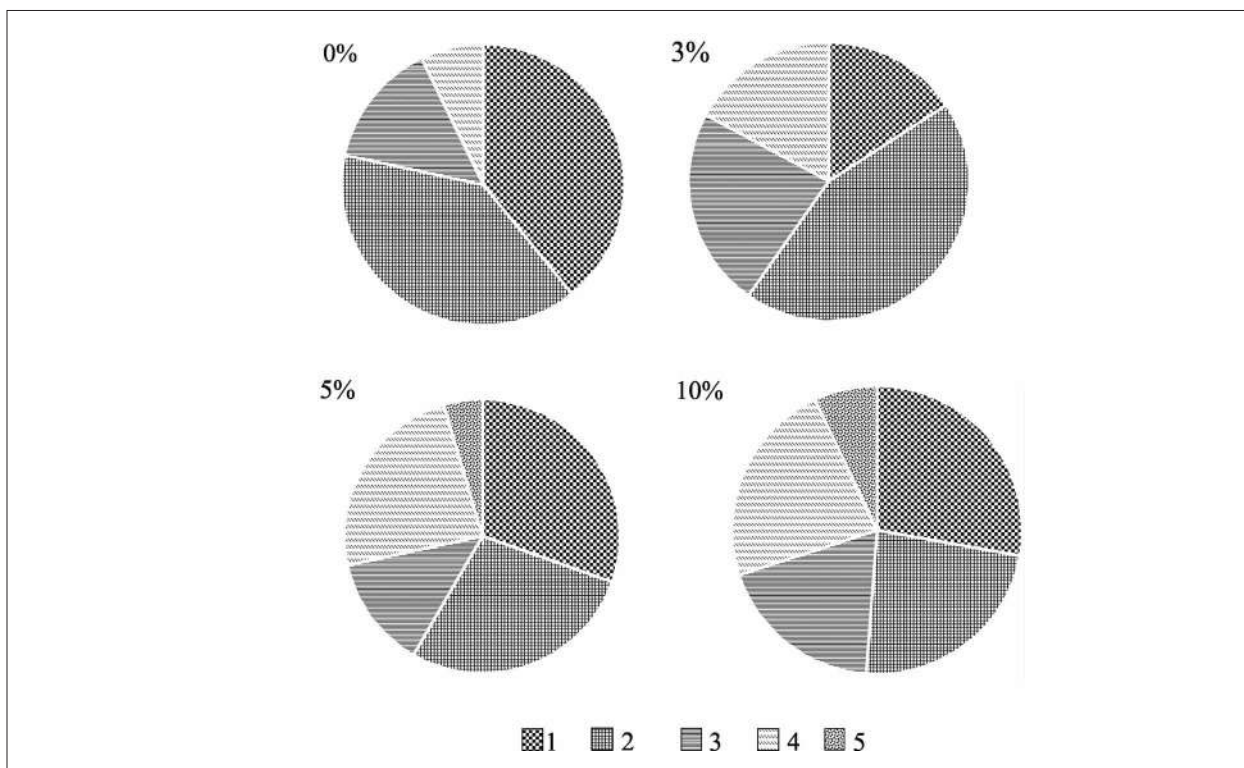


Рис. 2. Относительная частота хромосомных aberrаций в аномальных анафазах клеток корневого чехлика кресс-салата при воздействии бензина: 1 – множественные мосты; 2 – одиночные мосты; 3 – фрагменты; 4 – микроядра; 5 – комплексные aberrации
Fig. 2. Relative frequency of chromosomal abnormalities in abnormal anaphases of watercress root cap cells exposed by gasoline: 1 – multiple bridges; 2 – single bridges; 3 – fragments; 4 – micronucleus; 5 – complex aberrations

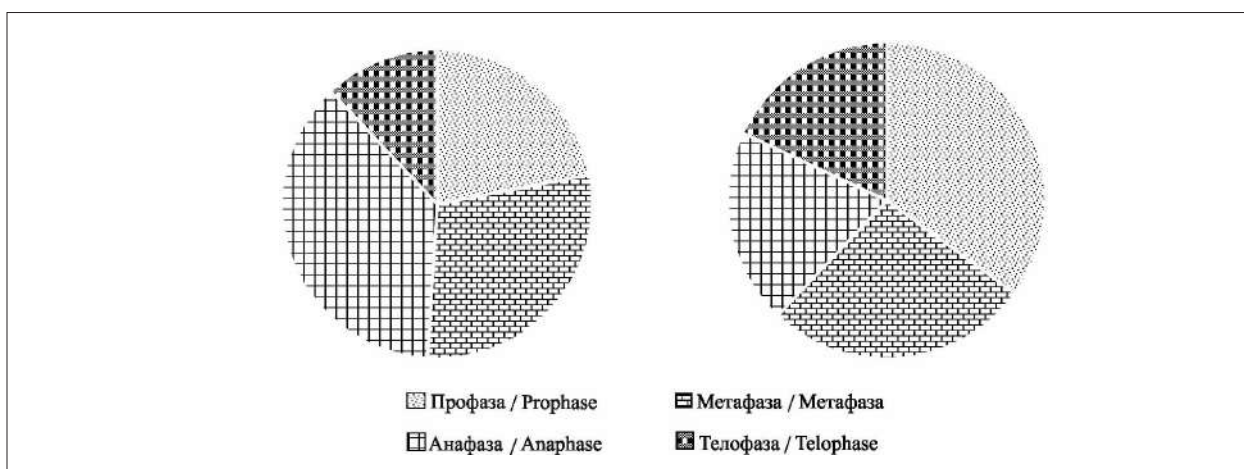


Рис. 3. Доля фаз (%) митоза в клетках корневого чехлика кресс-салата в контроле и при воздействии бензина
 Примечание: в контроле просчитано 27079 клеток, в опытных вариантах – 22657
Fig. 3. The proportion of mitosis phases (%) of in the watercress root cap cells in control and under gasoline exposure
 Note: 27,079 cells were counted in the control, 22,657 in the experimental variants

вследствие неблагоприятного воздействия среды согласуются с данными физиологической оценки животных организмов, в частности, оксидативного стресса. Так, чем выше скорость процессов окисления в тканях рыб, тем боль-

шее количество нарушений в ядре эритроцитов периферической крови: кариорексис (ядро при сохранении ядерной оболочки распадается на отдельные части), кариопикноз (хроматин ядра уплотняется) и кариолизис

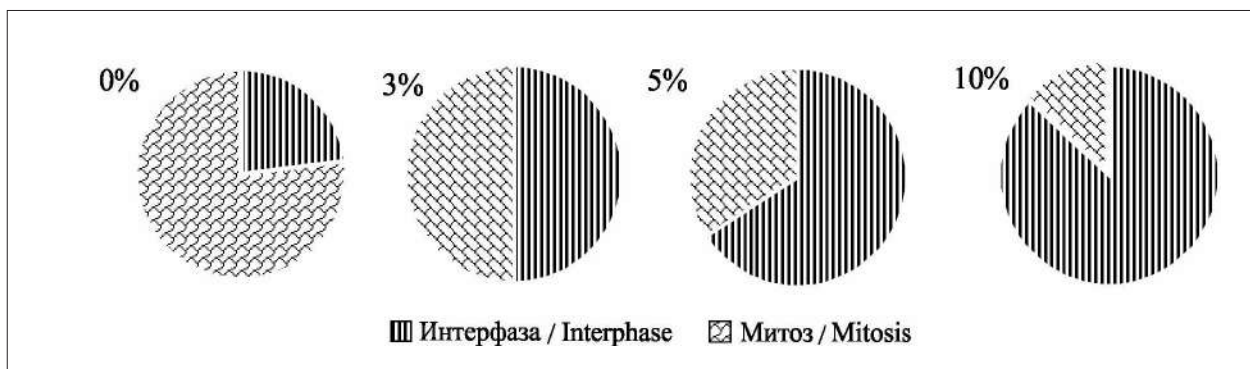


Рис. 4. Частота (%) делящихся клеток и клеток на стадии интерфазы ($n = 99780$) в клетках корневого чехлика кресс-салата
Fig. 4. Frequency (%) of dividing cells and interphase cells ($n = 99780$) in watercress root cap cells

(вытекание кариоплазмы в цитоплазму клетки). Однако между количеством эритроцитов с микроядрами, и процессами перекисления в тканях, связь, наоборот, отрицательная. Образование микроядер после воздействия свободных радикалов, по мнению авторов исследования, может являться адаптивной реакцией на данный стрессовый фактор [12, 13].

На изменение биохимического статуса клеток человека при действии бензина указано в работе [14], где выявлено нарушение активности различных ферментов, модификация генной активности, возможность ковалентного связывания бензина с ДНК. Изменение интенсивности перекисного окисления липидов, а также активности каталазы обнаружено при действии бензина марки АИ-92 на почвенные цианобактерии [15]. Бензин в высоких концентрациях детерминирует не только повышение активности окислительных ферментов, но и рост содержания фенолов и понижения концентрации хлорофиллов и каротиноидов [16]. Модификация биохимического фенотипа характерна и при действии нефти на двухстворчатых моллюсков [17].

Мутагенное действие бензина может быть результатом как комплекса всех его компонентов, так и отдельных составляющих. Выявлено мутагенное действие летучих фракций нефти [18]. Известен генотоксический эффект бензола, проявляющийся в повышении частоты хромосомных аномалий и снижении митотического индекса у мышей и крыс [19, 20]. Но в культуре клеток человека, в частности, у рабочих автозаправочных станций, наряду с увеличением уровня хромосомных мутаций, зарегистрировано повышение митотического индекса [21, 22].

Уменьшение доли делящихся клеток сопровождается снижением всхожести семян,

скорости ростовых процессов, выживаемости организмов, повышением уровня летальности, что объясняет, например, понижение уровня мутаций при воздействии генотоксикантов в высоких дозах. Такой результат показан при действии бензина АИ-95 [23], а также АИ-92 [24, 25], АИ-80, АИ-96 [25], и, кроме того, при характеристике других токсикантов [26, 27]. Бензин АИ-76, внесённый в образцы почвы в относительно низких концентрациях, стимулирует, а в больших концентрациях ингибирует всхожесть семян и рост сеянцев: *Artemisia diffusa*, *Lolium perenne*, *Festuca rubra maxim*, *Poa pratensis* и *Triticum aestivum* [28].

Уровень изменчивости морфометрических признаков в условиях загрязнения (в определённом диапазоне концентраций) часто повышен, что рассматривают в качестве адаптивной реакции, направленной на выживаемость популяций в изменившихся условиях существования [29]. Но длительное нефтяное загрязнение может детерминировать уменьшение генетического разнообразия, а, следовательно, понижать вероятность формирования устойчивости вида в условиях изменённой окружающей среды [30, 31].

Заключение

Полученные в работе результаты указывают на генотоксичность бензина АИ-95 в отношении кресс-салата *Lepidium sativum* L. Этот эффект проявляется в увеличении частоты хромосомных aberrаций, снижении митотической активности, изменении соотношения фаз митоза. Изменения на генетическом уровне сопровождаются понижением всхожести семян и уменьшением размеров вегетативных органов. Генотоксичность факторов среды расценивают как негативную характеристику,

так как последствием их влияния является увеличение частоты смертности организмов и отклонений в параметрах жизнедеятельности (максимальные при высоких концентрациях). Понижение всхожести семян и торможение роста растений может определять уменьшение массы продуцентов, которое неминуемо отразится на других уровнях пищевой цепи, а, следовательно, приведёт к нарушению функционирования всей экосистемы, что нежелательно как для наземных урбоэкосистем и агроландшафтов, так и водных экосистем.

В редких случаях увеличение скорости мутационного процесса может определить появление положительных мутаций, лежащих в основе эволюционных преобразований адаптивного характера, но вероятность возникновения таких адаптаций крайне низка. Существенные масштабы бензинового загрязнения, с высокой вероятностью сопряжённого с деградацией экосистем, обязывают исследователей искать пути снижения влияния негативного воздействия этого антропогенного фактора.

Литература

1. Ахальцева Л.В., Юрченко В.В., Юрцева Н.А., Конашкина М.А. Оценка генотоксичности пищевого красителя тартразина в микроядерном тесте *in vivo* // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 7. С. 798–801. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-798-801
2. Дурнев А.Д. Оценка генотоксичности наночастиц при использовании в медицине // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93. № 2. С. 76–83.
3. Калюжная Е.Э., Просеков А.Ю., Волобаев В.П. Генотоксические свойства фторид-иона (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 3. С. 253–258. doi: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258
4. Крюков В.И., Жучков С.А., Лазарева Т.Н., Киреева О.С., Поповичева Н.Н. Влияние КВЧ-излучения на частоту микроядер и ядерных аномалий в эритроцитах личинок амфибий // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2023. № 63. С. 101–112. doi: 10.17217/2079-0333-2023-63-101-112
5. Ловинская А.В., Колумбаева С.Ж., Суворова М.А., Илиясова А.И., Бияшева З.М., Абилев С.К. Комплексное исследование потенциальной токсичности и генотоксичности образцов воды из природных источников пригородной зоны г. Алматы // Экологическая генетика. 2019. Т. 17. № 2. С. 69–81. doi: 10.17816/ecogen17269-81
6. Гостимский С.А., Дьякова М.И., Ивановская Е.В., Монахова М.А. Практикум по цитогенетике. Москва: МГУ, 1974. 327 с.
7. Пухальский В.А., Соловьёв А.А., Бадаева Е.Д., Юрцев В.Н. Практикум по цитологии и цитогенетике растений. Москва: КолосС, 2007. 198 с.

8. Motykiewicz G., Hadnagy W., Seemayer N.N., Szeliga J., Tkocz A., Chorazy M. Influence of airborne suspended matter on mitotic cell division // Mutation Research/ Genetic Toxicology. 1991. V. 260. No. 2. P. 195–202. doi: 10.1016/0165-1218(91)90008-a
9. Боярских И.Г., Куликова А.И. Изменчивость цитогенетических характеристик в популяции *Lonicera caerulea* L. (жимолости синей) в зоне активных разломов // Экологическая генетика. 2017. Т. 15. № 2. С. 62–70. doi: 10.17816/ecogen15262-70
10. Филиппова Г.В., Прокопьев И.А., Шейн А.А. Влияние техногенного пылевого загрязнения на физиологические и цитогенетические характеристики семенного потомства лебеды раскидистой (*Atriplex patula* L.) // Наука и образование. 2015. № 3. С. 89–93.
11. Филиппова Г.В., Шейн А.А., Прокопьев И.А., Филиппов Э.В. Влияние малых концентраций ионов тяжёлых металлов на цитологические характеристики проростков ромашки лекарственной (*Matricaria chamomilla* L.) // Наука и образование. 2016. № 2. С. 102–107.
12. Кузина Т.В., Галактионова М.Л. Анализ взаимосвязи цитогенетического гомеостаза и оксидативного стресса в организме бычковых рыб Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 2. С. 64–72. doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-64-72
13. Кузина Т.В., Кузин А. В. Использование маркера оксидативного стресса (МДА) и цитогенетического маркера в системе эколого-генетического мониторинга Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1. С. 99–106. doi: 10.18470/1992-1098-2020-1-99-106
14. Ekpnyong C.E., Asuquo A. E. Recent advances in occupational and environmental health hazards of workers exposed to gasoline compounds // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2017. V. 30. No. 1. P. 1–26. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00800
15. Огородникова С.Ю., Зыкова Ю.Н., Березин Г.И., Домрачева Л.И., Калинин А.А. Комплексная оценка состояния цианобактерии *Nostoc paludosum* Kutz. при воздействии различных поллютантов // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 47–51. doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051
16. Денисова Е.С. Анализ устойчивости и аккумуляционной способности высших водных растений в условиях экологического загрязнения рек нефтепродуктами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8–4. С. 553–556.
17. Сухаренко Е.В., Недзвецкий В.С., Кириченко С.В. Биомаркеры нарушений метаболизма двустворчатых моллюсков в условиях загрязнения среды обитания продуктами переработки нефти // Biosystems Diversity. 2017. Т. 25. № 2. P. 113–118. doi: 10.15424/011717
18. Гумарова Ж.Ж., Бигалиев А.Б., Ерубаяева Г.К., Гумарова Л.Ж. Исследование мутагенного действия нефти при хроническом воздействии на лаборатор-

ных животных // Гигиена и санитария. 2012. № 4. С. 69–73.

19. Kiran C. Genotoxicity of benzene in mammalian cells (*Rattus rattus*) and its minimization by medicinal plant extracts and vitamin C // Journal of the Indian Society of Toxicology. 2012. V. 8. No. 1. P. 1–14.

20. Çavuşoğlu K., Yalçın E., Yapar K., Gür B., Çiçek F. The protective role of grape seed extract against chronic toxicity of benzene in swiss albino mice // Cumhuriyet Science Journal. 2014. V. 35. No. 1. P. 1–11.

21. Yadav J.S., Seth N. Cytogenetical damage in petrol pump workers // International Journal of Human Genetics. 2001. V. 1. No. 2. P. 145–150. doi: 10.1080/09723757.2001.11885750

22. El Mahdy N.M., Radwan N.M., Kharoub H.S., El-Halawany F. Chromosomal abnormalities among petrol station workers occupationally exposed to benzene // Current Journal of Applied Science and Technology. 2015. V. 7. No. 5. P. 502–513. doi: 10.9734/bjast/2015/16369

23. Волкова Е.О., Тупицына Л.С., Тупицын С.С., Сальникова Л.И. Выходность и морфометрические параметры растительного модельного объекта *Lepidium sativum* L. в условиях лабораторного загрязнения почвы бензином Аи-95 // АгроЭкоИнфо. 2020. № 4 (42). [Электронный ресурс] http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_405.pdf (Дата обращения: 16.12.2023).

24. Рагимов А.О., Мазиров М.А., Салаякин И.Е., Мазиров И.М. Влияние различных концентраций бензинового загрязнения пахотного горизонта дерново-подзолистой и серой лесной почвы на фитопатогенный потенциал растений различного видового состава // Владимирский земледелец. 2020. № 3 (93). С. 22–29. doi: 10.24411/2225-2584-2020-10127

25. Исаева А.У., Ешибаев А.А., Саданов А.К., Акынова Л.А. Влияние различных фракций нефти на морфометрические параметры растений // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 51–54. doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-051-54

26. Песня Д.А., Серов Д.А., Вакорин С.А., Прохорова И.М. Исследование токсического, митозмодифицирующего и мутагенного действия борщевика Сосновского // Ярославский педагогический вестник. Естественные науки. 2011. Т. 3. № 4. С. 93–98.

27. Котельникова А.Д., Фастовец И.А., Рогова О.Б., Столбова В.В. Токсичность лантана и церия в условиях биотеста с луком репчатый (*Allium cepa*) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. № 89. С. 54–67. doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-54-67

28. Утеулин К.Р. Метод оценки влияния летучего токсичного соединения на растения // Новости науки Казахстана. 2020. № 1. С. 32–41.

29. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние промышленного загрязнения тяжёлыми металлами на морфологические признаки *Phleum pratense* L. // Труды Карельского научного центра РАН. 2009. № 3. С. 50–55.

30. Боронникова С.В., Мандрица С.А., Светлакова Т.Н., Назаров А.В., Суслонов А.В. Изучение генетического разнообразия растений, произрастающих в условиях нефтяного загрязнения почв, с использованием ISSR-маркеров и на примере *Poa pratensis* L. // Экологическая генетика. 2010. Т. 8. № 1. С. 59–63.

31. Девятова Н.М., Бельтюкова Н.Н., Назаров А.В., Суслонов А.В., Светлакова Т.Н. Анализ генетического разнообразия *Poa pratensis* L. в условиях нефтяного загрязнения почв с использованием IRAP-маркеров // Аграрный вестник Урала. 2010. № 2 (68). С. 45–47.

References

1. Akhaltseva L.V., Yurchenko V.V., Yurtseva N.A., Konyashkina M.A. Evaluation of the genotoxicity of the food dye tartrazine in a micronucleus test *in vivo* // Gigiena i sanitariya. 2022. V. 101. No. 7. P. 798–801 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-7-798-801

2. Durnev A.D. Genotoxicity evaluation of nanoparticles // Gigiena i sanitariya. 2014. V. 93. No. 2. P. 76–83 (in Russian).

3. Kalyuzhnaya E.E., Prosekov A. Yu., Volobaev V.P. Genotoxic properties of fluorines (review) // Gigiena i sanitariya. 2020. V. 99. No. 3. P. 253–258 (in Russian). doi: 10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258

4. Kryukov V.I., Zhuchkov S.A., Lazareva T.N., Kireeva O.S., Popovicheva N.N. Influence of EHF radiation on frequency of micronuclei and nuclear anomalies in amphibian larva erythrocytes // Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. No. 63. P. 101–112 (in Russian). doi: 10.17217/2079-0333-2023-63-101-112

5. Lovinskaya A.V., Kolumbayeva S.Z., Suvorova M.A., Iliyassova A.I., Biyasheva Z.M., Abilev S.K. Complex study of potential toxicity and genotoxicity of water samples from natural sources of the suburban zone of Almaty // Ekologicheskaya genetika. 2019. V. 17. No. 2. P. 69–81 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen17269-81

6. Gostimsky S.A., Dyakova M.I., Ivanovskaya E.V., Monakhova M.A. Practical work on cytogenetics. Moskva: MGU, 1974. 327 p. (in Russian).

7. Pukhal'skiy V.A., Soloviev A.A., Badaeva E.D., Yurtsev V.N. Practical work on plant cytology and cytogenetics. Moskva: KolosS, 2007. 198 p. (in Russian).

8. Motykiewicz G., Hadnagy W., Seemayer N.N., Szeliga J., Tkocz A., Chorazy M. Influence of airborne suspended matter on mitotic cell division // Mutat. Res. 1991. V. 260. No. 2. P. 195–202. doi: 10.1016/0165-1218(91)90008-a

9. Boyarskikh I.G., Kulikova A.I. Variability of cytogenetic disturbances in *Lonicera caerulea* (blue honeysuckle) population in an active fault zone // Ekologicheskaya genetika. 2017. V. 15. No. 2. P. 62–70 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen15262-70

10. Filippova G.V., Prokopyev I.A., Shein A.A. Impact of technogenic dust pollution on the physiological and cytogenetic parameters on the sprawling quinoa (*Atriplex patula* L.) seed progeny // *Nauka i obrazovanie*. 2015. No. 3. P. 89–93 (in Russian).
11. Filippova G.V., Shein A.A., Prokopyev I.A., Filipov E.V. Impact of low heavy metal ions concentrations on the cytological parameters of chamomile seedlings (*Matricaria chamomilla* L.) // *Nauka i obrazovanie*. 2016. No. 2. P. 102–107 (in Russian).
12. Kuzina T.V., Galaktionova M.L. Analysis of the interrelation of cytogenetic homeostasis and oxidative stress in the organism of Goby fish (Gobiidae) of the Northern Caspian // *South of Russia: ecology, development*. 2018. V. 13. No. 2. P. 64–72 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-64-72
13. Kuzina T.V., Kuzin A.V. Use of oxidative stress (MDA) markers and cytogenetic markers in the ecological-genetic monitoring of the Northern Caspian Sea // *South of Russia: ecology, development*. 2020. V. 15. No. 1. P. 99–106 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2020-1-99-106
14. Ekpenyong C.E., Asuquo A.E. Recent advances in occupational and environmental health hazards of workers exposed to gasoline compounds // *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*. 2017. V. 30. No. 1. P. 1–26. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00800
15. Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N., Berezin G.I., Domracheva L.I., Kalinin A.A. The comprehensive assessment of the state of cyanobacteria *Nostoc paludosum* Kütz. by exposed of various pollutants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 3. P. 47–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-3-047-051
16. Denisova E.S. The research of the higher aquatic plants stability and accumulation ability in the condition of river ecological pollution with oil products // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2016. No. 8-4. P. 553–556 (in Russian).
17. Sukharenko E.V., Nedzvetskiy V.S., Kirichenko S.V. Biomarkers of metabolism disturbance in bivalve molluscs induced by environmental pollution with processed by-products of oil // *Biosystems Diversity*. 2017. V. 25. No. 2. P. 113–118 (in Russian). doi: 10.15421/011717
18. Gumarova Zh.Zh., Bigaliev A.B., Erubaeva G.K., Gumarova L.Zh. Study of the mutagenic activity of petroleum upon chronic exposure in laboratory animals // *Gigiena i sanitariya*. 2012. No. 4. P. 69–73 (in Russian).
19. Kiran C. Genotoxicity of benzene in mammalian cells (*Rattus rattus*) and its minimization by medicinal plant extracts and vitamin C // *Journal of the Indian Society of Toxicology*. 2012. V. 8. No. 1. P. 1–14.
20. Çavuşoğlu K., Yalçın E., Yapar K., Gür B., Çiçek F. The protective role of grape seed extract against chronic toxicity of benzene in swiss albino mice // *Cumhuriyet Science Journal*. 2014. V. 35. No. 1. P. 1–11.
21. Yadav J.S., Seth N. Cytogenetical damage in petrol pump workers // *International Journal of Human Genetics*. 2001. V. 1. No. 2. P. 145–150. doi: 10.1080/09723757.2001.11885750
22. El Mahdy N.M., Radwan N.M., Kharoub H.S., El-Halawany F. Chromosomal abnormalities among petrol station workers occupationally exposed to benzene // *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2015. V. 7. No. 5. P. 502–513. doi: 10.9734/bjast/2015/16369
23. Volkova E.O., Tupitsyna L.S., Tupitsyn S.S., Salnikova L.I. Germination and morphometric parameters of the plant model object *Lepidium sativum* L. under laboratory soil contamination with AI-95 gasoline // *AgroEkoInfo*. 2020. No. 4 (42) [Internet resource] http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_405.pdf (Accessed: 16.12.2023) (in Russian).
24. Ragimov A.O., Mazirov M.A. Salyakin I.E., Mazirov I.M. Impact of gasoline contamination various concentration of arable soddy podzolic and grey forest soil on the phytopathogenic potential of plants different species // *Vladimirskiy zemledec*. 2020. No. 3 (93). P. 22–29 (in Russian). doi: 10.24411/2225-2584-2020-10127
25. Isaeva A.U., Yeshibaev A.A., Sadanov A.K., Akyonova L.A. Influence of different oil fractions on plant morphometric parameters // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 2. P. 51–54 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-051-54
26. Pesnja D.A., Serov D.A., Vakorin S.A., Prokhorova I.M. Research of the toxic, mitosis modifying and mutagen effect of *Heracleum Sosnowskyi* // *Jaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. Estestvennye nauki*. 2011. V. 3. No. 4. P. 93–98 (in Russian).
27. Kotelnikova A.D., Fastovets I.A., Rogova O.B., Stolbova V.V. The toxicity of lanthanum and cerium in conditions of biotest with *Allium cepa* // *Bulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*. 2017. No. 89. P. 54–67 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-54-67
28. Uteulin K.R. Method for assessing the effect of a volatile toxic compound on plants // *Novosti nauki Kazahstana*. 2020. No. 1. P. 32–41 (in Russian).
29. Kaznina N.M., Titov A.F., Laidinen G.F., Batova Yu.V. Effect of industrial heavy metal pollution of soil on the morphological characteristics of *Phleum pratense* L. // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. 2009. P. 50–55 (in Russian).
30. Boronnikova S.V., Mandritsa S.A., Svetlakova T.N., Nazarov A.V., Suslonov A.V. Genetic variability of plants grown on oily soils investigation by the use of ISSR-markers on *Poa pratensis* L. model // *Ekologicheskaya genetika*. 2010. V. 8. No. 1. P. 59–63 (in Russian).
31. Devyatova N.M., Beltyukova N.N., Nazarov A.V., Suslonov A.V., Svetlakova T.N. Analysis of genetic diversity of *Poa pratensis* L. under soils of oil pollution using IRAP-markers // *Agrarnyy Vestnik Urala*. 2010. No. 2 (68). P. 45–47 (in Russian).

Diversity of soil diatom communities of Frolikhinsky State Nature Reserve

© 2024. A. I. Fazlutdinova¹ ORCID: 0000-0001-7971-6690[†]

N. V. Sukhanova¹ ORCID: 0000-0002-6130-6172[†]

L. A. Gaysina^{1,2} ORCID: 0000-0002-0920-6449[†]

¹M. Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3-a, Oktyabrskoy revoliucii St., Ufa, Russia, 450008,

²All-Russian Research Institute of Phytopathology,

5, Institute St., B. Vyazyomy, Odintsovo District, Moscow Region, Russia, 143050,

e-mail: lira.gaisina@gmail.com

The species composition of soil diatoms in Frolikhinsky State Nature Reserve was studied. Flora of diatoms algae was represented with 128 taxa of 4 classes, 12 orders, 23 families and 49 genera. The greatest diversity of species was found on the bank of the Bireya River (77 species), and the lowest – on the Barguzinsky ridge pass (3 species). In most species and intraspecific taxa of diatoms (97%) found in the reserve, the occurrence rate varied from 10 to 40%. An occurrence rate above 40% was noted only in four taxa that were identified as leading: *Pinnularia borealis* (80%), *Adlafia bryophila* (50%), *Gomphonema parvulum* (50%) and *Planothidium lanceolatum* (50%). The complex of dominant species was diverse and included representatives of 15 families. 36 species and intraspecific taxa were classified as dominants, 20 taxa were classified as subdominants. The complex of associated species included 6 taxa, 67 taxa were found singly and occasionally. *Pinnularia borealis* Ehrenberg had the highest occurrence at all sites. The families Fragilariaceae, Achnanthidiaceae, Naviculaceae, Achnanthaceae, Gomphonemataceae, Cymbellaceae, Cocconeidaceae, Eunotiaceae, Pinnulariaceae, Bacillariaceae, Sellaphoraceae were characterized by high species diversity. Comparison of diatoms complexes (DC) in different plots of the reserve revealed similarities and differences of floristic diversity and taxonomic structure. The main reasons of taxonomic heterogeneity of DC in different areas are the conditions defined by their location within the natural reserve. The largest number of species was found on the shores of water bodies characterized by a high degree of moisture. The least abundant and diverse diatoms were represented in shaded and insufficiently moist areas of coniferous forests with abundant coniferous litter and acidic soils.

Keywords: habitat, diatoms complexes (DC), species composition, Lake Baikal, *Pinnularia borealis*, *Adlafia bryophila*, *Gomphonema parvulum*, *Planothidium lanceolatum*.

УДК 582.232/.275-152.6

Разнообразие сообществ почвенных диатомовых водорослей Государственного природного заказника «Фролихинский»

© 2024. А. И. Фазлутдинова¹, к. б. н., доцент,

Н. В. Суханова¹, д. б. н., профессор,

Л. А. Гайсина^{1,2}, д. б. н., доцент,

научный руководитель сектора научно-технической интеграции,

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

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,
143050, Россия, Московская область, Одинцовский район,

р. п. Большие Вяземы, ул. Институт, д. 5,

e-mail: lira.gaisina@gmail.com

Изучен видовой состав почвенных диатомовых водорослей Государственного природного заказника «Фролихинский». Флора диатомовых водорослей представлена 128 таксонами из 4 классов, 12 порядков, 23 семейств и 49 родов. Выявлены группы наиболее часто встречающихся видов, доминант и субдоминант. Разнообразие и обилие диатомовых водорослей, встречающихся в почвах заказника, может быть охарактеризовано как высокое. Таксономическое богатство и разнообразие сообществ диатомовых водорослей исследованных участков суще-

ственно отличались друг от друга. Наибольшее разнообразие видов выявлено на участке возле реки Бирея (77), наименьшее – на перевале Баргузинского хребта (3). У большинства видов и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей (97%), обнаруженных на территории заказника, показатель встречаемости варьировал от 10 до 40%. Показатель встречаемости выше 40% был отмечен только у четырёх таксонов, которые были выделены в ранг ведущих: *Pinnularia borealis* (80%), *Adlafia bryophila* (50%), *Gomphonema parvulum* (50%) и *Planothidium lanceolatum* (50%). Комплекс доминирующих видов был разнообразным и включал представителей 15 семейств. К доминантам относилось 36 видов и внутривидовых таксонов, к субдоминантам – 20 таксонов. Комплекс сопутствующих видов включал 6 таксонов, 67 таксонов встречались единично и эпизодически. Самую высокую встречаемость на всех участках имела *Pinnularia borealis* Ehrenberg. **Высоким видовым разнообразием отличались семейства Fragilariaceae, Achnanthesiaceae, Naviculaceae, Achnanthesaceae, Gomphonemataceae, Cymbellaceae, Cosconeidaceae, Eunotiaceae, Pinnulariaceae, Bacillariaceae, Sellaphoraceae.** Сравнение комплексов диатомовых водорослей разных участков на территории заказника выявило черты сходства и различия флористического разнообразия и таксономической структуры. Основными причинами таксономической неоднородности диатомовых комплексов в разных районах являются условия среды обитания, определяемые их расположением в пределах природного заказника. Наибольшее число видов было обнаружено на берегу водоёмов, характеризующихся высокой степенью увлажнения. Наименее обильно и разнообразно диатомовые водоросли были представлены на затенённых и недостаточно увлажнённых участках хвойного леса с обильным хвойным опадом и кислыми почвами.

Ключевые слова: местообитание, комплексы диатомовых водорослей, видовой состав, озеро Байкал, *Pinnularia borealis*, *Adlafia bryophila*, *Gomphonema parvulum*, *Planothidium lanceolatum*.

Nature reserves, national parks and other protected natural areas often serve as “centers of stability” for a given area of the biosphere and have a beneficial effect on habitats far beyond their borders. They make it possible to preserve natural communities and the existing genetic fund of organisms. The role of studying such territories is to accumulate scientific information that can be used to study the structure and functioning of various ecosystems. The biological diversity of protected natural areas is of great value because it represents an important biological indicator of the state of the environment, which sensitively responds to the entire complex of anthropogenic impacts over a long period of time [4]. One component of biological diversity is diatoms. Many species of diatoms are sensitive to the effects of environmental factors, which allows them to be used as bioindicators in monitoring the state of the natural environment [2, 3].

A large number of diverse works are devoted to the study of diatoms in the Baikal region [4–8]. However, the knowledge of diatoms in terrestrial communities in this region remains extremely poor today. In this regard, the study of diatom complexes (DC) is an important element in tracking changes in ecosystems, since the analysis of their species composition provides an integral assessment of the results of all natural and anthropogenic processes.

The purpose of the work was to study the structure of diatom complexes of different biotopes on the territory of the Frolikhinsky State Nature Reserve.

Objects and methods of research

The state natural reserve of federal significance “Frolikhinsky” is located in the North-

Baikal region of the Republic of Buryatia on the north-eastern coast of Lake Baikal, 40 km from the regional center – the township of Nizhnean-garsk and 45 km from the city of Severobaikalsk (55°26'13" N, 110°02'09" E). The reserve is included in the territory of the Central Ecological Zone of Lake Baikal and is part of the World Natural Heritage Site [9]. The climate of the Northern Baikal region is sharply continental, with a large amplitude of fluctuations in annual and daily temperatures. In January, the minimum average monthly temperature is from –22 to –40 °C, in July the maximum temperature is 17 °C. Atmospheric precipitation falls extremely unevenly. Formed under harsh climate and mountain conditions, the soils in the reserve are characterized by the composition of weathered rocks with certain signs of vertical zonation. Tundra soils dominate. The river valleys are swampy and are represented by humus-peaty-gley soils and, less commonly, alluvial-meadow soils. The territory of the reserve belongs to the coniferous taiga zone. Forests occupy 91.9 thousand hectares. Due to the cooling influence of Lake Baikal, the vegetation here resembles the pre-tundra strip of the northern taiga. The main forest-forming species are larch with an undergrowth of dwarf cedar and shrubby birch species, as well as pine and fir. There are cedar, spruce, aspen, and birch. The dwarf cedar grows both in the undergrowth and in continuous areas [9]. As can be seen from the characteristics of the study area, environmental conditions in the reserve are highly heterogeneous, which was taken into account during sampling.

During the research, four areas on the territory of the reserve were analyzed: 1 – the shore of Lake Levaya Frolikha (LF), 2 – the shore of the

Bireya River (BR), 3 – the Barguzinsky Ridge Pass (BRP) and 4 – the Khakusy sanatorium (KhS).

The material for this study was 10 mixed soil samples, consisting of 5–7 soil monoliths with a volume of 75–100 cm³. Sampling and analysis of species diversity were carried out using methods generally accepted in soil algology [10–12]. Technical preparation of the samples was carried out according to the classical method [13], the cell walls were cleared of protoplasts by boiling in concentrated nitric acid. To prepare the preparations, the cleaned cell walls were placed in Naphrax™ resin [14]. For species identification of diatom taxa, a series of keys were used [15–19].

The names of classes, orders, families, genera, species and intraspecific taxa are given mainly according to the system adopted in the Algaebase database (Table 1) [20]. A Zeiss Axio Imager A2 light microscope was used in this work. To determine the role of individual species and intraspecific taxa in the DC, there was used a method of assessing abundance, which was expressed in points on a modified six-point Kolbe-Wysłouch scale [2]. We included species and intraspecific taxa with abundance from 3 to 6 points into the dominant or main complex. Diatoms with 6 points were recognized as dominants, subdominants had 4–5 points, and representatives with scores below 3 were classified as accompanying. For each species, constancy (occurrence) was calculated using the formula:

$$C (\%) = n/N \cdot 100,$$

where n is the number of samples in which the species was found, N is the total number of samples. Taxa containing a higher than average number of species were classified as leading. The similarity of the DC in different parts of the reserve was judged by the coefficient of similarity of the floristic composition of Sørensen-Chekanovsky, which was calculated using the formula:

$$K = 2C/A+B,$$

where A and B are the number of species in each of the compared areas, C is the number of species common to them. The similarity coefficient is expressed in fractions of one; complete similarity is equal to one.

Results and discussion

The composition of diatoms in the Frolikhinsky State Nature Reserve included 128 taxa

from 4 classes, 12 orders, 23 families and 49 genera. Diatoms were observed in all sites examined.

In the sites of Lake Left Frolikha 74 species and infraspecific taxa have been identified. The dominant species were represented: *Achnanthis helveticum* (Hustedt) Monnier, Lange-Bertalot & Ector in Monnier et al., *A. minutissimum* (Kützing) Czarnecki, *Adlafia bryophila* (J.B. Petersen) Gerd Moser, Lange-Bertalot & D. Metzeltin, *Aulacoseira lacustris* (Grunow) Krammer, *Cavinula cocconeiformis* (Gregory ex Greville) D.G. Mann & A.J. Stickle, *Diatoma mesodon* (Ehrenberg) Kützing, *Encyonema minutum* (Hilse) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *Eunotia exigua* (Brébisson ex Kützing) Rabenhorst, *Fragilaria arcus* var. *recta* Cleve, *Gomphonema angustatum* (Kützing) Rabenhorst, *G. parvulum* (Kützing) Kützing, *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith, *Pinnularia borealis* Ehrenberg, *P. subcapitata* W. Gregory, *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot, *Stauroneis nobilis* Schumann, *Synedra ulna* (Nitzsch) Ehrenberg and *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing. Subdominant taxa were equally numerous: *Brachysira vitrea* (Grunow) R. Ross in Hartley, *Cocconeis pseudolineata* (Geitler) Lange-Bertalot in Werum & Lange-Bertalot, *Diatoma vulgare* Bory de Saint-Vincent, *Encyonema ventricosum* (C. Agardh) Grunow in A. Schmidt et al., *Eunotia praerupta* Ehrenberg, *Fragilaria capucina* var. *gracilis* (Oestrup) Hustedt, *Gomphonema affine* Kützing, *Mayamaea atomus* (Kützing) Lange-Bertalot, *Pinnularia microstauron* (Ehrenberg) Cleve, *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkovsky, *Stauroneis anceps* Ehrenberg and *Staurosira venter* (Ehrenberg) H. Kobayasi in Mayama et al. Also at the LF site, associated species such as: *Achnanthes marginulata* Grunow in Cleve & Grunow, *A. ventralis* (Krasske) Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Krammer, *Achnanthis subatomoides* (Hustedt) Monnier, Lange-Bertalot & Ector, *Adlafia minuscula* (Grunow) Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Genkal, *Aulacoseira crassipunctata* Krammer, *A. distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Caloneis bacillum* (Grunow) Cleve, *Cocconeis placentula* Ehrenberg, *C. placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow, *C. placentula* var. *lineata* (Ehrenberg) van Heurck, *Diademesis contenta* (Grunow ex Van Heurck) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *D. perpusilla* (Grunow) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *Diatoma anceps* (Ehrenberg) Kirchner, *Encyonema caespitosum* Kützing, *E. elginense* (Krammer) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *E. gracile*

Rabenhorst, *E. silesiacum* (Bleisch) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *Eunotia arcus* Ehrenberg, *E. implicata* Nörpel, Lange-Bertalot & Alles, *Eunotia intermedia* (Krasske) Nörpel & Lange-Bertalot in Lange-Bertalot, *E. paratridentula* Lange-Bertalot & Kulikovskiy, *E. serra* var. *tetraodon* (Ehrenberg) Nörpel, *Fragilaria biceps* Ehrenberg, *F. construens* (Ehrenberg) Grunow, *F. nitzschiioides* Grunow in van Heurck, *F. pinnata* var. *acuminata* (A. Mayer) Regenbogen, *Gomphoneis quadripunctatum* (Østrup) P. Dawson ex R. Ross & P.A. Sims, *Gomphonema helveticum* Brun, *G. minutum* (C. Agardh) C. Agardh, *Hannaea arcus* (Ehrenberg) R.M. Patrick in R.M. Patrick & L.R. Freese, *Hantzschia abundans* Lange-Bertalot, *Navicula cryptocephala* Kützing, *N. oppugnata* Hustedt, *N. radiosa* Kützing, *N. subrotundata* Hustedt, *Neidium iridis* (Ehrenberg) Cleve, *Pinnularia appendiculata* (C. Agardh) Cleve, *P. intermedia* (Lagerstedt) Cleve, *Planothidium conspicuum* (Mayer) E.A. Morales, *P. delicatulum* (Kützing) Round & Bukhtiyarova, *Rossithidium petersenii* (Hustedt) Round & Bukhtiyarova, *Sellaphora bacillum* (Ehrenberg) D.G. Mann, *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing and *Ulnaria delicatissima* (W. Smith) M. Aboal & P.C. Silva.

In soil samples taken from the bank of the Bireya River, the largest number of species and intraspecific taxa of diatoms was discovered – 77 (60% of the total species diversity). The dominant species were: *Achnanthes delicatula* subsp. *septentrionalis* (Østrup) Lange-Bertalot, *A. lanceolata* var. *rostrata* Hustedt, *Achnantheidium helveticum*, *Adlafia minuscula*, *Amphora ovalis* (Kützing) Kützing, *A. pediculus* (Kützing) Grunow ex A. Schmidt, *Craticula halophila* (Grunow) D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *Cocconeis placentula* var. *lineata*, *C. pseudolineata*, *Encyonema minutum*, *E. silesiacum*, *Fragilaria pinnata* var. *acuminata*, *Gomphonema parvulum*, *Karayevia laterostrata* (Hustedt) Bukhtiyarova, *Mayamaea atomus*, *Navicula cincta* (Ehrenberg) Ralfs in Pritchard, *Nitzschia fonticola* (Grunow) Grunow in Van Heurck, *Pinnularia borealis*, *Planothidium delicatulum*, *P. lanceolatum* and *Staurosira venter*. Subdominant species were less representative: *Achnanthes lacus-baicali* Skvortzov, *Achnantheidium subsalsum* (J.B. Petersen) M. Aboal, *Caloneis bacillum*, *Encyonema ventricosum*, *Fistulifera pelliculosa* (Brébisson) Lange-Bertalot, *Fragilaria nitzschiioides*, *Gomphonema clavatum* Ehrenberg, *Halamphora normanii* (Rabenhorst) Levkov, *Navicula cryptocephala*, *Nitzschia palea*, *Opephora mutabilis* (Grunow) Sabbe & Wyver-

man, *Planothidium frequentissimum* (Lange-Bertalot) Round & L. Bukhtiyarova, *Sellaphora mutata* (Krasske) Lange-Bertalot and *S. pupula*. This site was characterized by the presence of a large number of associated, sporadic species with low abundance scores: *Achnantheiopsis lanceolata* (Sovereign) Lange-Bertalot, *Achnanthes flexella* var. *alpestris* Brun, *A. lanceolata* var. *bacalensis* (Skvortzov) Sheshukova, *A. lanceolata* var. *magna* (Straub) Lange-Bertalot, *A. lanceolata* subsp. *robusta* (Hustedt) Lange-Bertalot, *A. lanceolata* subsp. *robusta* (Hustedt) Lange-Bertalot, *A. minutissima* Kützing, *A. obliqua* (Gregory) Hustedt, *A. oestrupii* (Cleve-Euler) Hustedt, *Adlafia bryophila*, *Amphora sibirica* Skvortzov & Meyer, *Cocconeis placentula* var. *baikalensis* Skvortzov, *Cyclotella striata* (Kützing) Grunow, *Cymbella affinis* Kützing, *C. stuxbergii* (Cleve) Cleve, *Diatoma vulgare*, *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt in A. Schmidt, *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve, *D. oblongella* (Nägeli ex Kützing) Cleve-Euler in Cleve-Euler & Osvald, *Encyonema elginense*, *Eucoconeis flexella* (Kützing) Meister, *Fallacia pygmaea* (Kützing) A.J. Stickle & D.G. Mann in Round, Crawford & Mann, *Fragilaria capucina* Desmazières, *Geissleria paludosa* (Hustedt) Lange-Bertalot & Metzeltin, *Gomphoneis quadripunctatum*, *Gomphonema affine*, *G. angustatum*, *G. angustatum* var. *sarcophagus* (Gregory) Grunow in van Heurck, *G. minutum*, *G. olivaceum* (Hornemann) Brébisson, *G. vibrio* var. *intricatum* (Kützing) Playfair, *Hannaea arcus*, *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova, *Luticola mutica* (Kützing) D.G. Mann in Round et al., *N. lanceolata* Ehrenberg, *N. leptostriata* Jørgensen, *N. subrotundata*, *Pinnularia* sp. 1, *Planothidium peragalloi* (J. Brun & Héribaud-Joseph) Round & L. Bukhtiyarova, *Psammothidium oblongellum* (Østrup) Van de Vijver in Van de Vijver, Frenot & Beyens, *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) Otto Müller, *Sellaphora bacilloides* (Hustedt) Z. Levkov, S. Krstic & T. Nakov in Levkov, Nakov & Metzeltin, *Synedra ulna* and *Tryblionella angustata* W. Smith.

The diatom complex of the Barguzinsky Ridge site included only three species of algae, two species were classified as subdominants (*Pinnularia borealis* and *Tabellaria flocculosa*) and one accompanying species – *Synedra ulna* (with an abundance score of 2 points).

The soil samples in the area near the hot springs of the Khakusy sanatorium were dominated by: *Achnanthes delicatula* subsp. *septentrionalis*, *A. lanceolata* var. *rostrate*, *Achnantheidium helveticum*, *Amphora pediculus*, *Cocconeis*

Table 1

Taxonomic richness and diversity of the DC in different parts of the Frolikhinsky State Nature Reserve

Index	LF	BR	BRP	KhS
Number of classes	3	4	2	3
Number of orders	8	9	3	7
Number of families	18	17	3	15
Number of genera	30	37	3	22

Note: LF – Lake Levaya Frolikha, BR – the Bireya River, BRP – Barguzinsky ridge pass, KhS – Khakusy sanatorium.

Table 2

Number of species (diagonal), number of common taxa (under the diagonal) and coefficients of similarity of DC at plots (above the diagonal)

Plots	LF	BR	BRP	KhS
LF	74	0,37	0,08	0,30
BR	28	77	0,05	0,50
BRP	3	2	3	0,08
KhS	16	29	1	37

Note: LF – lake Levaya Frolikha, BR – the Bireya river, BRP – Barguzinsky ridge pass, KhS – Khakusy sanatorium.

placentula var. *lineata*, *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve & Grunow, *Pinnularia borealis*, *Planothidium delicatulum*, *P. frequentissimum* and *P. lanceolatum*. The group of subdominants was represented by the following taxa of diatoms: *Adlafia minuscula*, *Encyonema silesiacum*, *Fragilaria pinnata* var. *acuminate*, *Gomphonema minutum*, *G. parvulum*, *Mayamaea atomus*, *Navicula cincta* and *Sellaphora mutata*. The associated species complex was not very specific, all taxa identified were found at previously surveyed sites. This group included: *Achnanthes lacus-baicali*, *A. oestrupii*, *Adlafia bryophila*, *Caloneis bacillum*, *C. dubia* Krammer in Lange-Bertalot & Krammer, *Craticula halophila*, *Cocconeis pediculus* Ehrenberg, *C. neodiminuta* Krammer, *C. placentula*, *Diploneis oblongella*, *Fistulifera pelliculosa*, *Fragilaria capucina*, *Gomphonema clavatum*, *Navicula leptostriata*, *Nitzschia palea*, *Placoneis elginensis* (Gregory) E.J. Cox, *Rhopalodia gibba*, *Sellaphora bacillum* and *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller.

The diversity and abundance of diatoms found in the reserve's soils can be described as high. The revealed taxonomic richness and diversity of DC showed their inequality in different areas (Table 1).

For the majority of species and infraspecific taxa of diatoms (97%) found on the territory of the reserve, the occurrence rate varied from 10 to 40%. An occurrence rate above 40% was observed in only four taxa that were identified as leading: *Pinnularia borealis* (80%), *Adlafia bryophila* (50%), *Gomphonema parvulum* (50%) and *Planothidium lanceolatum* (50%). The complex of dominant species was diverse

and included representatives of 15 families. The dominants included 36 species and intraspecific taxa, and the subdominants included 20 taxa. The complex of associated species included 6 taxa, 67 taxa were encountered singly and occasionally.

A comparison of the DC of different parts of the natural reserve revealed similarities and differences in a number of their basic parameters. The degree of similarity of the diatom flora of the studied areas was generally low (Table 2).

Its greatest value ($K=0.50$) was noted for sections of bank of the Bireya river and the Khakusy sanatorium, perhaps this is due to their close territorial location (Table 2). The DC of the banks of the Bireya River and Barguzinsky ridge were especially different ($K=0.05$). The number of species in the studied areas also varied greatly depending on the habitat and ranged from 3 to 78 species. A common feature of all sites was the presence of the families Pinnulariaceae and Fragilariaceae. The leading families – Achnanthaceae, Achnanthidiaceae, Cymbellaceae, Gomphonemataceae and Naviculaceae, each of which included at least 7% of the species composition, were represented differently in DC.

As already mentioned, the communities of diatoms in different areas differed in the set of species and intraspecific taxa. Therefore, diatom complexes are characterized by areas that are determined by local landscape conditions.

Shore of Lake Levaya Frolikha. Three biotopes were considered on the site: a section of floodplain forest, the shores of Lake Levaya Frolikha in the splash zone and at a distance of 50 m from the water's edge. Representatives of seven families played a significant role in the

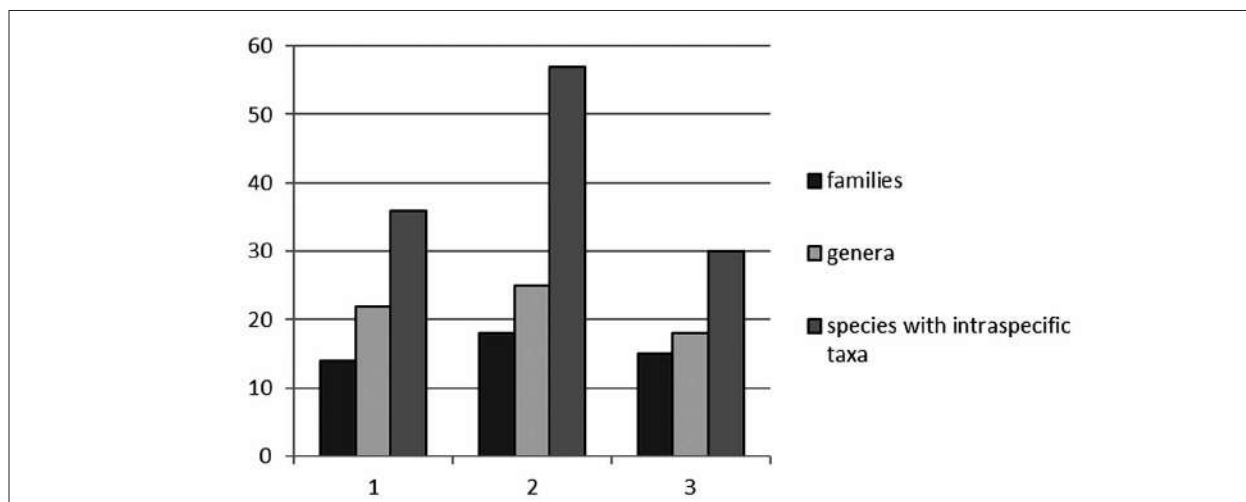


Fig. 1. Diversity of DC on the site of the bank of lake Levaya Frolikha: 1, 2, 3 – see the location of sampling sites in see in text (here and in other figures)

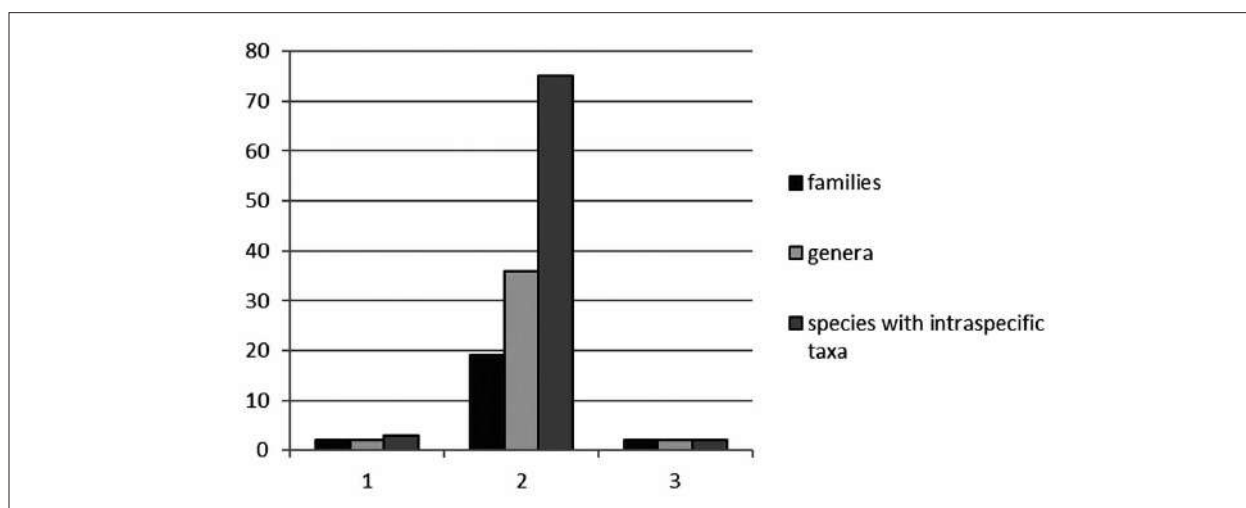


Fig. 2. Diversity of DC on the bank of the Bireya River

formation of the DC. The first place was occupied by the family Fragilariaceae with 13 species, in second place there were two families (Naviculaceae and Cymbellaceae), including 8 taxa each, in third place were the families Eunotiaceae and Achnanthidiaceae, with 7 species each. Next were the families Gomphonemataceae (6) and Pinnulariaceae (5). The remaining families accounted for 27% of the total species diversity of this site. In the splash zone, 36 species from 14 families and 22 genera were identified (Fig. 1).

In the soil of a forest area on the lake shore, 57 species were found (44% of the total species diversity), and the number of species increased due to the ecotone effect. The increase occurred due to the introduction of species from aquatic and forest habitats, which is quite natural in aquatic-terrestrial transition spaces [21–23]. In

soil samples from a floodplain forest, 30 species of algae from 15 families and 18 genera were identified.

Bank of the Bireya River. In the study area, different biotopes were selected for analysis: a section of taiga forest with thickets of elfin pine, a river floodplain in the splash zone, and its terrace above the floodplain. The taxonomic structure of this diatom complex is quite complex. In this area, the first place was occupied by the family Naviculaceae (11 species), followed by families containing 10 taxa: Achnanthaceae, Achnanthidiaceae and Gomphonemataceae. In third place there is the family Fragilariaceae with 8 species, followed by the family Cymbellaceae with 6 taxa. Soil samples from the forest area and the floodplain terrace were characterized by poor species diversity (Fig. 2).

Three species were found in the taiga: *Gom-*

phonema affine, *Pinnularia borealis* and *Pinnularia* sp.1. In the area of the floodplain terrace, two species were identified: *Luticola mutica* and *Pinnularia borealis*. Moreover, in both biomes *P. borealis* acted as a dominant; no subdominants or associated species were identified. The largest number of species and intraspecific taxa (74) was noted in soil samples taken from the coastal strip of the Bireya River (58% of the total).

Soil diatoms found on the territory of Frolikhinsky State Nature Reserve are presented in Figure 3.

Plot near the Khakusy sanatorium. Three

biotopes were analyzed: a path in the taiga, a section of taiga with thickets of dwarf pine, and the shoreline of the Lake Baikal. The diatom communities of this site were similar in taxonomic structure to the communities of the bank of the Bireya River. The leading position of the families Naviculaceae, Ahnanthaceae, Achnanthidiaceae was also noted, with the exception of the family Gomphonemataceae, which was replaced here by the family Cocconeidaceae. Despite the taxonomic similarity, it is worth noting the difference in the quantitative indicators of diatoms at two adjacent sites. On the territory of the Khakusy

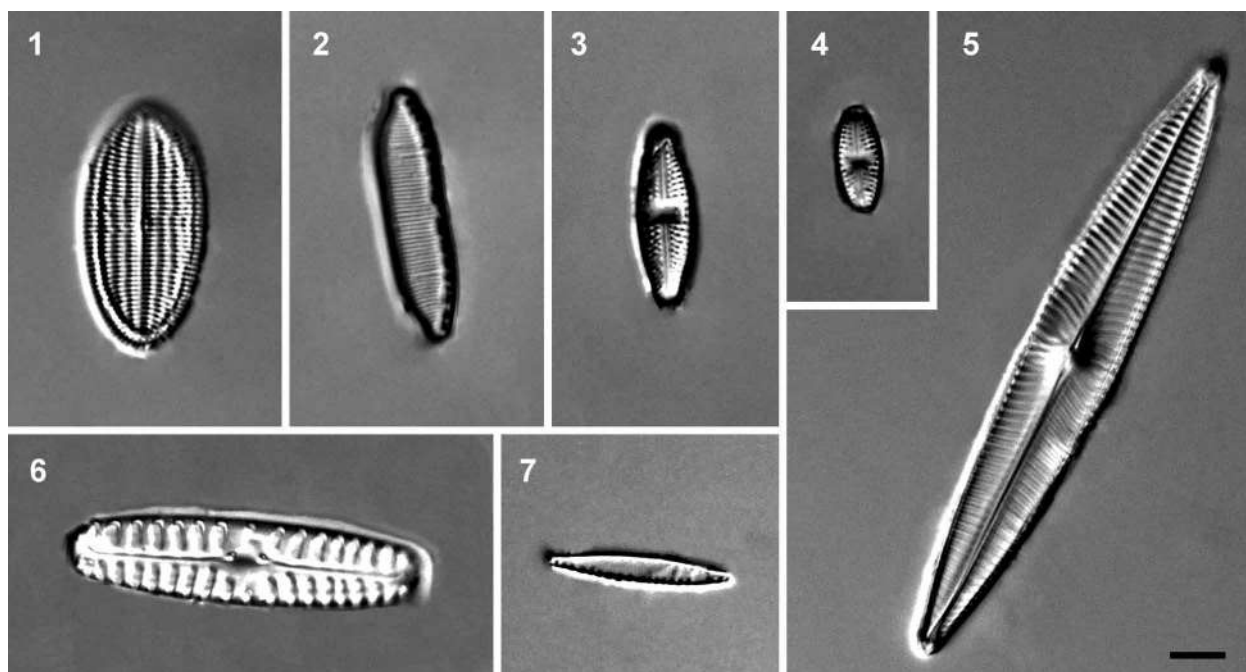


Fig. 3. Soil diatoms of Frolikhinsky State Nature Reserve: 1 – *Cocconeis placentula*; 2 – *Hantzschia amphioxys*; 3 – *Luticola mutica*; 4 – *Mayamaea atomus*; 5 – *Navicula radiosa*; 6 – *Pinnularia borealis*; 7 – *Nitzschia fonticola*. Scale bar equals to 10 μm

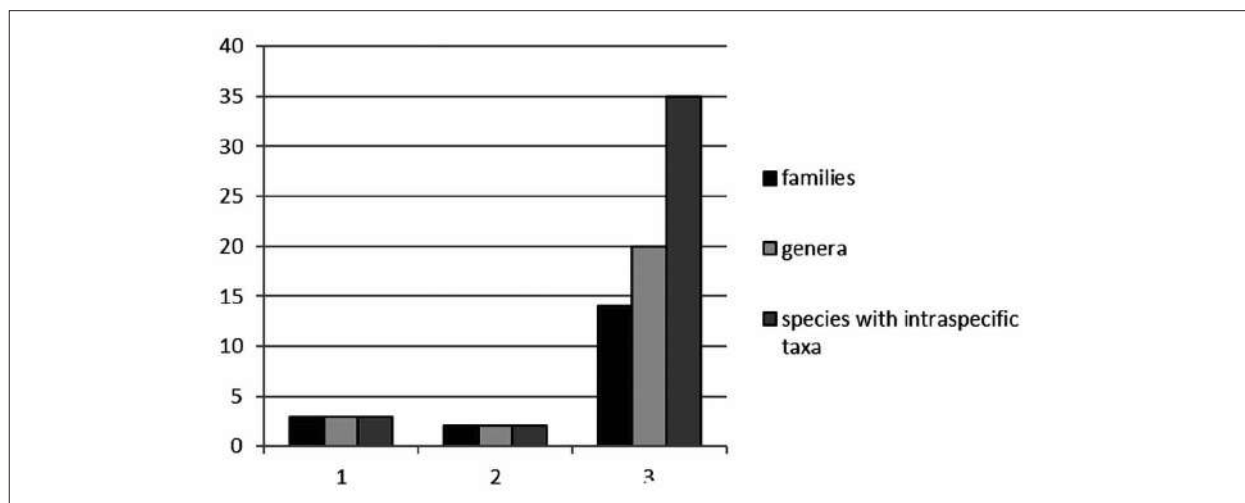


Fig. 4. A diversity of DC on the site of the Khakusy sanatorium

sanatorium, there was a clear decrease in the abundance of the three leading families by more than 2 times. In general, the site of the Khakusy sanatorium was characterized by average species richness; 37 species with intraspecific taxa were identified here. The fewest algae species were identified in forest soil (Fig. 4).

This is quite natural, since the flora of the dwarf pine belt is extremely poor, the development of photoautotrophs is largely suppressed, and many species cannot adapt to unsuitable environmental conditions [24]. Two species were found in the soil of the forest plot: *Hantzschia amphioxys* and *Pinnularia borealis*, both taxa dominated in abundance. On the footpath passing through this area, the number of species increased to three. The increase was due to the introduction of *Fragilaria pinnata* var. *acuminata*, which was represented singly in this biotope, and on the coast of the Lake Baikal was a subdominant. *Hantzschia amphioxys* and *Pinnularia borealis* were also dominant here. On the coast of the Lake Baikal, 35 species and varieties of diatoms have been identified.

Section Barguzinsky ridge. The smallest DC was identified here. The reason for this is the location of the site – a coniferous taiga zone, with acidic and slightly acidic soils, unfavorable for the development of diatoms. At the Barguzinsky ridge pass, no leading families were identified; three families found here (Fragilariaceae, Pinnulariaceae, Tabellariaceae) each had one species.

The territory of the Frolikhinsky nature reserve, most of which is located in the taiga zone, is characterized by the presence of a typical mountainous terrain. The presence of these two ecological conditions implies insignificant floristic species diversity, which is formed by a monodominant community of cold-loving and acidophilic species of diatoms, characterized by significant abundance, which is usually reflected in a large number of dominants and subdominants [25, 26]. However, our studies showed a high floristic diversity of this territory (128 taxa). This surge in diversity can be explained by the introduction of intrazonal biotopes (in this case, floodplains of rivers and lakes), in which polydominant groups of diatoms with a large number of accompanying and rarely encountered hydrophilic species are formed.

Diatom complexes of the natural reserve have a complex taxonomic structure. The greatest abundance and diversity were noted in areas that are well moistened and located in close proximity to water bodies. The characteristic features of such DC are the predominance of the

families Fragilariaceae, Ahnanthaceae, Achnantheaceae, Naviculaceae, Gomphonemataceae, Cymbellaceae and Eunotiaceae. However, for certain sections the structure is greatly simplified. The low diversity of diatoms noted in forest biotopes can be explained by the fact that these areas are located in the coniferous taiga zone and are unfavorable for the development of diatoms. Environmental factors limiting the development of diatoms in coniferous forests include the presence of coniferous litter, an acidic reaction of the environment, low illumination, and insufficient moisture [26–28]. An increased role of diatoms was not observed even on paths where more favorable conditions are created for diatoms [29, 30]. The diatom community of the taiga forests of the reserve is predominantly represented by Pinnulariaceae and Bacillariaceae. The species composition of each site is formed from the species of dominant complexes characteristic of the territory as a whole, and specific taxa found only in this particular habitat. Most representatives of the families Achnantheaceae, Bacillariaceae, Cymbellaceae, Fragilariaceae, Gomphonemataceae, Naviculaceae, Pinnulariaceae, included in the main complex, are present in the flora of all areas, but they achieve leading positions in communities in different areas. For example, *Adlafia bryophila* dominated only on the shore of the LF, and *Gomphonema parvulum* and *Planothidium lanceolatum* acted as dominants in three sites, and were absent in the BRP site. Against the background of the dominance of individual diatoms being confined to certain habitats, *Pinnularia borealis* stands out. The widespread distribution of *P. borealis* indicates good adaptation of the species to a wide range of environmental conditions and a high ability to compete in diverse diatom communities.

Conclusion

Studies of the DC of different areas on the territory of the Frolikhinsky nature reserve showed that the species composition and dominant complexes of diatoms in different areas were formed depending on the ecological conditions of the habitats. The largest number of species was found on the shores of reservoirs characterized by a high degree of moisture. The least abundant and diverse diatoms were present in shaded and insufficiently moistened areas of coniferous forest with abundant coniferous litter and acidic soils.

It should be noted that the territory of the Frolikhinsky nature reserve has not yet been

well studied, and with an increase in the number of studies, one should expect the discovery of a larger number of taxa of diatoms.

The study was supported by grant from the partner university “M. E. Evseyev Mordovian State Pedagogical University” for the year 2022 and the Ministry of Education of the Russian Federation, grant number BWUZ-2023-0006.

Литература

1. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Проблемы, понятия и термины современной экологии: Словарь-справочник. Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. 400 с.
2. Стенина А.С. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) в озёрах Большеземельской тундры. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2009. 176 с.
3. Фазлутдинова А.И., Кабиров Р.Р. Почвенные диатомовые водоросли Южного Урала. Уфа: Гилем, 2013. 128 с.
4. Помазкина Г.В., Родионова Е.В. Бентосные Bacillariophyta в Южном Байкале (Россия) // Бот. журн. 2004. Т. 14. № 1. С. 62–72.
5. Помазкина Г.В., Щербаклова Т.А. Характеристика массовых видов Bacillariophyta литоральной зоны оз. Байкал (Россия) // Альгология. 2011. Т. 21. № 1. С. 52–69.
6. Генкал С.И., Куликовский М.С., Кузнецова И.В. Центрические диатомовые водоросли восточного побережья озера Байкал (Россия). Ярославль: Филигрань, 2020. 430 с.
7. Егорова И.Н., Коновалов М.С., Шергина О.В., Дударева Н.В., Тушикова Г.С. Ассоциации водорослей и мохообразных рода *Hedwigia* P. Beauv. в горной тайге Хэнтэя (Забайкальский край, Россия) // Сибирский лесной журнал. 2020. № 6. С. 64–80.
8. Kulikovskiy M.S., Lange-Bertalot H., Metzeltin D., Witkowski A. Lake Baikal: hotspot of endemic diatoms I // *Iconographia Diatomologica* / Ed. H. Lange-Bertalot. Koenigstein: Koeltz Scientific Books, 2012. V. 23. P. 7–607.
9. О «Заповедном Подлеморье» (zapovednoe-podlemorye.ru) [Электронный ресурс] <https://zapovednoe-podlemorye.ru/t> (Дата обращения: 16.08.2022).
10. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 144 с.
11. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
12. Хазиев Ф.Х., Кабиров Р.Р. Количественные методы почвенно-альгологических исследований. Уфа: БФАН СССР, 1986. 172 с.
13. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Отв. ред. А.И. Прошкина-Лавренко. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.
14. Acker F., Russell B., Morales E. Preparation of Diatom Slides Using Naphrax™ Mounting Medium. PCER. ANSP. Protocol P-13-49. 2002. P. 41–54.
15. Ettl H., Gartner G. Syllabus der boden-, luft-, und flechtentalgen. Stuttgart: VEB Gustav Fischer Verlag, 1995. 724 p.
16. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1: Naviculaceae // *Sußwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart, New-York: VEB Gustav Fischer Verlag Bd. 2, 1986. 876 p.
17. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // *Sußwasserflora von Mitteleuropa*. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd 2, 1988. 536 p.
18. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 3: Centrales; Fragilariaceae, Eunotiaceae // *Sußwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd 2, 1991. 576 p.
19. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 4: Ahnanthaceae, Kritische ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und gomphonema gesamtliteratur verzeichnis // *Sußwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd 2, 1991. 437 p.
20. AlgaeBase [Электронный ресурс] <https://www.algaebase.org> (Дата обращения: 16.08.2022).
21. Фазлутдинова А.И. Флора Bacillariophyta пойменных почв // Гидробиотика: Тез. докл. V Всерос. конф. по водным растениям. Борок: Институт биологии внутренних вод, 2000. С. 87–88.
22. Стенина А.С., Тетерюк Б.Ю., Патова Е.Н. Растительные сообщества прибрежных экотонов озера в долине реки Вангыр на Приполярном Урале // Тр. Коми науч. центра УрО РАН. 2001. № 165. С. 20–36.
23. Шарипова М.Ю. Альгоценозы водно-наземных экотонов и их экологическая характеристика // Теоретическая и прикладная экология. 2007. № 3. С. 11–14. doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-011-014
24. Толмачев А.И. Методы сравнительной флористики и проблемы флорогенеза. Новосибирск: «Наука» Новосибирское отделение, 1986. 196 с.
25. Сугачкова Е.В., Фазлутдинова А.И. Почвенные водоросли Эцтальских Альп // Вестник ОГУ. 2009. № 6. С. 613–615.
26. Новаковская И.В., Патова Е.Н. Почвенные водоросли еловых лесов и их изменения в условиях аэротехногенного загрязнения. Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2011. 128 с.
27. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 149 с.
28. Фазлутдинова А.И. Диатомовые водоросли лесных экосистем Южного Урала // Лесоведение. 2013. № 1. С. 65–73.
29. Суханова Н.В., Фазлутдинова А.И., Хайбуллина Л.С. Диатомовые водоросли почв городских парков // Почвоведение. 2000. № 7. С. 840–846.
30. Хайбуллина Л.С., Суханова Н.В., Кабиров Р.Р. Флора и синтаксономия почвенных водорослей и цианобактерий урбанизированных территорий. Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. 216 с.

References

1. Mirkin B.M., Naumova L.G. Problems, concepts and terms of modern ecology: Dictionary-reference book. Ufa: AN RB, Gilem, 2010. 400 p. (in Russian).
2. Stenina A.S. Diatoms (Bacillariophyta) in the lakes of the Bolshezemelskaya tundra. Syktyvkar: Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 176 p. (in Russian).
3. Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Soil diatoms of the Southern Urals. Ufa: Guilem, 2013. 128 p. (in Russian).
4. Pomazkina G.V., Rodionova E.V. Benthic Bacillariophyta in Southern Baikal (Russia) // Bot. magazine 2004. V. 14. No. 1. P. 62–72 (in Russian).
5. Pomazkina G.V., Shcherbakova T.A. Characteristics of mass species of Bacillariophyta in the littoral zone of Lake Baikal Baikal (Russia) // Algology. 2011. V. 24. No. 1. P. 52–69 (in Russian).
6. Genkal S.I., Kulikovskiy M.S., Kuznetsova I.V. Centric diatoms of the eastern coast of Lake Baikal (Russia). Yaroslavl: Filigran, 2020. 430 p. (in Russian).
7. Egorova I.N., Konovalov M.S., Shergina O.V., Dudareva N.V., Tupikova G.S. Associations of algae and bryophytes of the genus *Hedwigia* P. Beauv. in the mountain taiga of Khentei (Zabaikalsky Krai, Russia) // Siberian Forest Journal. 2020. No. 6. P. 64–80 (in Russian).
8. Kulikovskiy M.S., Lange-Bertalot H., Metzeltin D., Witkowski A. Lake Baikal: hotspot of endemic diatoms I // Iconographia Diatomologica / Ed. H. Lange–Bertalot. Koenigstein: Koeltz Scientific Books, 2012. V. 23. P. 7–607.
9. About the “Reserved Podlemorye” (zapovednoe-podlemorye.ru) [Internet resource] <https://zapovednoe-podlemorye.ru/> (Accessed: 16.08.2022).
10. Shtina E.A., Gollerbakh M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).
11. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).
12. Khaziev F.Kh., Kabirov R.R. Quantitative methods of soil-algological research. Ufa: BFAN USSR, 1986. 172 p. (in Russian).
13. Diatoms of the USSR (fossil and modern) / Ed. A.I. Proshkin-Lavrenko. V. 1. Leningrad: Nauka, 1974. 403 p. (in Russian).
14. Acker F., Russell B., Morales E. Preparation of Diatom Slides Using Naphrax™ Mounting Medium. PCER. ANSP. Protocol P-13-49. 2002. P. 41–54.
15. Ettl H., Gartner G. Syllabus der boden-, luft-, und flechtenalgen. Stuttgart: VEB Gustav Fischer Verlag, 1995. 724 p.
16. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 1: Naviculaceae // Sußwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, New-York: VEB Gustav Fischer Verlag Bd. 2, 1986. 876 p.
17. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Sußwasserflora von Mitteleuropa. Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd 2, 1988. 536 p.
18. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 3: Centrales; Fragilariaceae, Eunotiaceae // Sußwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd 2, 1991. 576 p.
19. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. 4: Ahnanthaceae, Kritische ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und gomphonema gesamtliteratur verzeichnis // Sußwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, Jena: VEB Gustav Fischer Verlag. Bd. 2, 1991. 437 p.
20. AlgaeBase [Internet resource] <https://www.algaebase.org> (Accessed: 16.08.2022).
21. Fazlutdinova A.I. Flora of Bacillariophyta of floodplain soils // Hydrobotany: Proceedings. report V All-Russian conf. on aquatic plants. Borok: Institute of Inland Water Biology, 2000. P. 87–88 (in Russian).
22. Stenina A.S., Teteryuk B.Yu., Patova E.H. Plant communities of coastal ecotones of the lake in the valley of the Vangyr River in the Subpolar Urals // Trudy Komi nauchnogo tsentra UrORAN. 2001. No. 165. P. 20–36 (in Russian).
23. Sharipova M.Yu. Algocenoses of water-terrestrial ecotones and their ecological characteristics // Theoretical and Applied Ecology. 2007. No. 3. P. 11–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-3-011-014
24. Tolmachev A.I. Methods of comparative floristics and problems of florogenesis. Novosibirsk: “Nauka” Novosibirsk branch, 1986. 196 p. (in Russian).
25. Sugachkova E.V., Fazlutdinova A.I. Soil algae of the Ötztal Alps // Vestnik OSU. 2009. No. 6. P. 613–615 (in Russian).
26. Novakovskaya I.V., Patova E.N. Soil algae of spruce forests and their changes under conditions of aerotechnogenic pollution. Syktyvkar: Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011. 128 p. (in Russian).
27. Aleksakhina T.I., Shtina E.A. Soil algae of forest biogeocenoses. Moskva: Nauka, 1984. 149 p. (in Russian).
28. Fazlutdinova A.I. Diatoms of forest ecosystems of the Southern Urals // Lesovedenie. 2013. No. 1. P. 65–73 (in Russian).
29. Sukhanova N.V., Fazlutdinova A.I., Khaibullina L.S. Diatoms in the soils of urban parks // Eurasian Soil Science. 2000. No. 7. P. 840–846 (in Russian).
30. Khaibullina L.S., Sukhanova N.V., Kabirov R.R. Flora and syntaxonomy of soil algae and cyanobacteria in urban areas. Ufa: AN RB, Gilem, 2011. 216 p. (in Russian).

Функциональные характеристики почек возобновления *Heracleum sosnowskyi* Manden. в период подготовки к перезимовке

© 2024. С. П. Маслова, д. б. н., в. н. с., О. В. Дымова, д. б. н., в. н. с.,
Р. В. Малышев, к. б. н., н. с., И. В. Далькэ, к. б. н., зав. лабораторией,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: maslova@ib.komisc.ru

На основе изучения структурных и физиолого-биохимических характеристик почек возобновления *Heracleum sosnowskyi* Manden. выявлены функциональные адаптации в период подготовки растений к перезимовке. Температура замерзания воды в тканях почек возобновления в октябре составляла минус 12 °С при сохранении высокой оводнённости (более 80%). Сравнительно высокая эффективность дыхания почек возобновления при низких положительных температурах (2–5 °С) благоприятствует морфообразовательным процессам в конусе нарастания побега осенью. В период подготовки к перезимовке почки возобновления накапливали осморегуляторы – растворимые сахара, свободные аминокислоты, в том числе пролин. Ткани почек возобновления характеризовались сравнительно высоким уровнем гормонов роста цитокининов, что способствует формообразовательным процессам осенью и повышает холодоустойчивость растений. В декабре, при установлении устойчивого снежного покрова, обнаружено увеличение содержания абсцизовой кислоты – ингибитора роста и гормона покоя и снижение уровня цитокининов. Растения *H. sosnowskyi* формировали почки возобновления, различающиеся по уровню содержания фотосинтетических пигментов. Наибольшее количество хлорофиллов и каротиноидов накапливали почки с зелёными покровными чешуями, наименьшее – с красно-бурыми и жёлтыми. Накопление каротиноидов в тканях зелёных почек возобновления защищает сформированный фотосинтетический аппарат в условиях низких положительных температур поздней осенью.

Ключевые слова: *Heracleum sosnowskyi*, почки возобновления, дыхание, неструктурные углеводы, аминокислоты, фотосинтетические пигменты, фитогормоны, перезимовка.

Functional characteristics of *Heracleum sosnowskyi* Manden. terminal buds during preparation for overwintering

© 2024. S. P. Maslova ORCID: 0000-0002-5269-5129, O. V. Dymova ORCID: 0000-0003-2008-6350,
R. V. Malyshev ORCID: 0000-0001-6716-6118, I. V. Dalke ORCID: 0000-0001-5711-9916,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: maslova@ib.komisc.ru

Based on the study of the physiological and biochemical characteristics of *Heracleum sosnowskyi* buds we identified functional adaptations during the preparation of plants for overwintering. The freezing point of water in the buds tissues was –12 °C in October, while maintaining high water content (more than 80%). Buds has a relatively high efficiency of respiration at low positive temperatures (2–5 °C), which favors morphogenesis processes in the shoot vegetative cone in autumn. During the preparation for overwintering the buds accumulated osmoregulators – soluble sugars, free amino acids, including proline. A relatively high level of cytokinin growth hormones was found in the buds tissues. This contributes to morphogenesis processes and increases plant cold tolerance. We found that in December the abscisic acid (a growth inhibitor and resting hormone) content increases and the level of cytokinins decrease. *Heracleum sosnowskyi* formed buds differing in the photosynthetic pigments content. Buds with green scale leaves accumulated the greatest amount of chlorophylls and carotenoids, while those with red-brown and yellow ones accumulated the least. The carotenoids accumulation in the green buds tissues protects the formed photosynthetic apparatus at low positive temperatures in autumn. The results on the functional state of *H. sosnowskyi* terminal buds

in natural populations indicate the absence of deep dormancy in plants, and morphogenesis processes in meristems tissues are limited by winter temperatures.

Keywords: *Heracleum sosnowskyi*, buds, respiration, non-structural carbohydrates, amino acids, photosynthetic pigments, phytohormones, overwintering.

Одним из важных эволюционных приобретений многолетних растений является периодичность роста, формирование почек регулярного возобновления. Почки возобновления растений являются зонами интенсивного роста с высокой долей меристематических тканей, в них осуществляются морфогенетические процессы развития в течение всего годичного цикла развития побега. Сведения о функциональных перестройках, осуществляемых в процессе роста и морфогенеза почек возобновления многолетних трав, малочисленны [1–3]. В период «холодового закаливания» в почках возобновления многолетних растений происходит накопление энерго-пластических веществ и криопротекторов (растворимых углеводов и защитных белков), меняется гормональный баланс, сдвигается температурный оптимум роста и метаболических процессов в сторону низких положительных температур. Это способствует сохранению жизнеспособности меристем в зимний период и обеспечивает высокую скорость роста многолетних растений весной.

Удобной моделью для изучения механизмов роста и морфогенеза побега на начальных этапах развития являются почки возобновления борщевика Сосновского – *Heracleum sosnowskyi*. Растения *H. sosnowskyi* характеризуются высоким накоплением биомассы, эффективностью использования ресурсов среды и устойчивостью к неблагоприятным факторам за счёт формирования значительного банка семян и почек возобновления [4]. Взрослые вегетативные и генеративные растения отрастают весной благодаря почкам возобновления, которые закладываются на стеблекорне осенью предыдущего года [5]. Почки возобновления *H. sosnowskyi* окружены многослойными покровными чешуями и располагаются на глубине 8–10 см в почве, что позволяет им избегать действия низкой отрицательной температуры в осенне-зимний и ранневесенний периоды [6]. Мы полагаем, что структурные адаптации почек возобновления *H. sosnowskyi* связаны с физиолого-биохимическими приспособлениями меристематических тканей к низким температурам в осенне-зимний период.

Целью исследований было изучить физиолого-биохимические характеристики

почек возобновления *H. sosnowskyi* в осенний период с целью выявления адаптивных приспособлений растений в период подготовки к перезимовке.

Материалы и методы исследований

Моделью для исследований были терминальные, зимующие почки возобновления растений борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.), формирующиеся на верхушке подземного каудекса [4]. Это многолетний летнезелёный, травянистый, стержнекорневой, моноподиально нарастающий монокарпик с полурозеточным прямостоячим побегом [7] из семейства Зонтичные.

Опыты проводили в 2019–2020 гг. на экспериментальном участке с зарослями *H. sosnowskyi* вблизи г. Сыктывкара (61,6764 с. ш., 50,8099 в. д.). Осенью (сентябрь–октябрь) и зимой (декабрь) ювенильные и взрослые вегетативные растения в возрасте 2-х – 6-ти лет выкапывали, отмывали и отбирали терминальные почки возобновления.

Осенние почки *H. sosnowskyi* отличаются по окраске покровных чешуй, формируя зелёные, красно-бурые и жёлтые почки возобновления. У разнокачественных почек изучали содержание фотосинтетических пигментов – хлорофиллов и каротиноидов. В средней пробе из почек разной окраски определяли концентрацию растворимых углеводов, свободных аминокислот, свободных фитогормонов, скорость метаболического тепловыделения и дыхания, температуру замерзания воды в тканях.

Определение температуры замерзания воды. В тканях почек возобновления определяли температуру замерзания воды с помощью дифференциального калориметра DSC-60 («Shimadzu», Япония) [3]. Сегмент апекса побега длиной около 5 мм помещали в алюминиевый контейнер объёмом 100 мм³. Образцы охлаждали от 5 до минус 30 °С со скоростью 1 °С/мин. Температуру начала кристаллизации воды (начало фазового перехода вода – лёд) рассчитывали с помощью программного обеспечения (TA-60WS).

Измерение калореспиromетрических показателей. Скорость метаболического тепловыделения почек измеряли методом прямого

калориметрирования [7]. Измерения тепловыделения (q , мкВт/мг сухой массы) и дыхания (R_{CO_2} , нмоль/мг сухой массы ч с) проводили на микрокалориметре «Биотест-2» (Институт биологического приборостроения Российской Академии наук, г. Пущино, Россия). В каждую ячейку «Биотест-2» помещали по одной почке возобновления с одного растения (сырая масса 150–200 мг) и определяли q . Интенсивность R_{CO_2} рассчитывали по тепловому эффекту реакции выделяемого почками CO_2 с 0,4 М раствором NaOH [8]. На основании термодинамической модели [8] рассчитывали скорость запасаения энергии на рост в эквивалентах запасённой энергии ($\Delta H_B R_{SG}$, мкВт/мг сухой массы). Для выявления влияния температуры на метаболизм почек возобновления – скорость тепловыделения, дыхания и запасаения энергии измеряли при 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 °С. При каждой температуре использовали по 4–7 проб свежего материала, включающих почки возобновления.

Определение содержания неструктурных углеводов. Разделение и определение содержания растворимых углеводов проводили методом ВЭЖХ с нормальной фазой. Для фиксации проб свежего растительного материала (1–3 г) и экстрагирования из них углеводов использовали 96%- и 80%-ный этиловый спирт соответственно. С целью очищения растительных экстрактов от примесей проводили твёрдофазную экстракцию на концентрирующих патронах Диапак-амин («БиоХимМак», Россия). Разделение углеводов – на колонке «250Ч4 мм Диасорб-130-АМИН», зернение – 6 мкм («БиоХимМак», Россия) с рефрактометром в качестве детектора. Элюентом служила смесь ацетонитрил:вода (соотношение 70:30), скорость элюирования – 0,6 мл/мин. Анализ вели с применением стандартных растворов: D-Кси, D-Фру, D-мальтозы, D-Гал, D-Глю, Сах, D-раффинозы.

Изучение содержания свободных аминокислот. Свободные аминокислоты извлекали 40%-ным этанолом и определяли на анализаторе «ААА-400» (Чехия) в системе литиевых буферов. Качественный состав и количественное содержание белковых аминокислот определяли на аминокислотном анализаторе («ААА Т-339») после гидролиза навески в 6 н HCl при 105 °С в течение 24 ч. Содержание общего азота определяли с помощью элементного CHNS-O анализатора «EA-111» (Италия).

Измерение концентрации свободных фитогормонов. Для определения ИУК, цито-

кининов (ЦК) и абсцизовой кислоты (АБК) навески лиофилизированных растительных тканей гомогенизировали, заливали холодным 70%-ным этанолом и экстрагировали 18 ч при +4 °С. Осадок отделяли центрифугированием, супернатант упаривали до водного остатка, который делили на 2 части: одна часть – для определения АБК и ИУК, другая – для определения цитокининов [9]. Из аликвоты водного остатка АБК и ИУК экстрагировали диэтиловым эфиром, подкисленным до pH 2,5, переводили из органической фазы в 1%-ный раствор гидрокарбоната натрия и реэкстрагировали эфиром после подкисления, метелировали диазометаном. Для определения содержания гормонов методом ИФА использовали антитела к АБК и ИУК [10]. Цитокинины из аликвоты водного остатка (после центрифугирования) концентрировали на колонке C_{18} , после чего гормоны элюировали 80% этанолом. Разделение ЦК проводили с помощью ТСХ в системе растворителей бутанол:аммиак:вода (6:1:2 v/v). Элюаты из силуфола, соответствующие цитокининовым стандартам зон, центрифугировали и использовали для иммуноанализа с применением сыворотки с антителами к зеатинрибозиду (ZR).

Содержание хлорофиллов и каротиноидов. Определение проводили на спектрофотометре UV-1700 («Shimadzu», Япония) в ацетоновой вытяжке при максимумах поглощения – 662 и 644 нм для хлорофилла *a* и *b* соответственно, 478 нм – для каротиноидов [11].

Все биохимические анализы проводили в 2–3-кратной аналитической повторности на 3–5 независимых образцах.

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программы Statistica 10 («StatSoft Inc.», США). Значимость различий между средними величинами измеряемых показателей оценивали с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и критерия Дункана. В таблицах и на рисунках приведены средние арифметические значения со стандартной ошибкой.

Результаты и обсуждение

Растения *H. sosnowskyi* формируют вегетативные почки возобновления, которые закладываются на каудексе осенью [4, 5]. Судя по глубине залегания почек возобновления в почве (табл. 1), растения *H. sosnowskyi* следует отнести к геофитам, а не гемикриптофитам, как было описано ранее [5] со ссылкой

Таблица 1 / Table 1

Структурно-функциональные характеристики почек возобновления *Heracleum sosnowskyi* в осенний период / Structural and functional indicators of *Heracleum sosnowskyi* buds in autumn

Показатели / Index	Значение / Value
Глубина залегания почек возобновления, см / Renewal bud depth, cm	9,0±1,0
Температура замерзания воды, °С / Freezing point of water, °C	-12,2±0,6
Оводнённость, % / Hydration, %	83,3±3,0
Концентрация растворимых углеводов, мг/г сухой массы Concentration of soluble carbohydrates, mg/g DW	22,8±0,6* 88,4±3,2**
Концентрация общего азота, % / Total nitrogen concentration, %	3,7±0,4

Примечание: * – моносахариды, ** – дисахариды.
Note: * – monosaccharides, ** – disaccharides.

Таблица 2 / Table 2

Зависимость интенсивности метаболизма почек возобновления *Heracleum sosnowskyi* от температуры в осенний период / Dependence of *Heracleum sosnowskyi* bud metabolic rate on temperature in autumn

Температура, °С Temperature, °C	q , мкВт/мг сухой массы q , $\mu\text{W}/\text{mg DW}$	R_{CO_2} , нмоль/мг сухой массы с R_{CO_2} , nmol/mg DW s	$DH_B R_{SG}$, мкВт/мг сухой массы $DH_B R_{SG}$, $\mu\text{W}/\text{mg DW}$	$q/455R_{CO_2}$
2	5,7±1,2	0,06±0,01	21,4±3,5	0,20±0,03
5	3,8±0,6	0,030±0,003	11,4±1,1	0,20±0,03
10	10,2±1,4	0,040±0,003	9,6±2,2	0,50±0,06
15	15,3±1,2	0,050±0,006	8,2±1,5	0,60±0,03
20	25,4±1,2	0,070±0,004	7,5±1,6	0,80±0,05
25	32,0±2,9	0,080±0,005	5,2±1,4	0,80±0,06
30	34,0±1,4	0,090±0,006	9,5±3,4	0,80±0,07

на систему жизненных форм Раункиера. Растения-геофиты прячут почки возобновления глубоко в почву, защищаясь от низких температур в условиях сезонного климата. На севере закладка зимующих почек осуществляется в августе, а заложение генеративных органов происходит в конце мая [5]. Сокращение длительности органогенеза растений *H. sosnowskyi* является одним из приспособлений к короткому периоду вегетации, когда развитие репродуктивных структур происходит в один вегетационный период года зацветания.

Осенью почки возобновления *H. sosnowskyi* имели высокую дыхательную способность, около 5 мг CO_2 /г сухой массы ч). Это вдвое выше дыхания листьев дикорастущих видов в период их активного роста в условиях севера [12, 13]. Скорость дыхания тканей почек возобновления *H. sosnowskyi* возростала экспоненциально от 1,5 до 17 мг CO_2 /г сухой массы ч) в диапазоне температуры 5–40 °С [14].

Расчёты, основанные на данных калориметрических определений температурной зависимости скорости дыхания и тепловыделения, показали сравнительно высокую эффективность дыхания (запасание образующейся в дыхании энергии) в терминальных почках при низкой положительной температуре (табл. 2).

Судя по показателю скорости запасаания энергии ($\Delta H_B R_{SG}$) и величине соотношения $q/455R_{CO_2}$, температуры в области 2–5 °С наиболее благоприятны для роста и эффективного использования энергии в морфообразовательных процессах почек возобновления *H. sosnowskyi* в осенне-зимний период.

Наши наблюдения показали, что растения *H. sosnowskyi* «втягиваются» в почву на глубину до 9 см (табл. 1), где почвенный слой промерзает в зимний период до минус 3 °С. Осенью и зимой температура фазового перехода вода – лёд в почках возобновления составляла около минус 12 °С. Это говорит о запасе прочности тканей почек возобновления к низким температурам при перезимовке растений.

При подготовке растений к перезимовке почки возобновления содержали более 100 мг/г сухой массы сахаров, 75% которых приходилось на дисахариды (табл. 1). Ткани почек возобновления накапливали более 50 мг/г сухой массы свободных аминокислот и амидов, 90% которых составляли богатые азотом амиды – глутамин и аспарагин (табл. 3). Кроме амидов, в тканях почек возобновления *H. sosnowskyi* обнаружено 18 аминокислот, из них 3 – непотеиногенные (γ -аминомасляная кислота, орнитин и β -аланин). Содержание пролина – аминокислоты, ответственной за

осморегуляцию, – составляло 1,3 мг/г сухой массы. Почки возобновления содержали значительное количество мочевины, являющейся депо азота. Концентрация общего азота в тканях почек возобновления была сравнительно высокой, около 4% (табл. 1). Вещества первичного метаболизма могут служить осморегуляторами в осенне-зимнее время, повышая устойчивость меристематических тканей к низким температурам.

Фитогормоны являются химическими медиаторами, которые выполняют широкий спектр функций, в том числе регуляцию роста и развития растений. Осенью в конце сентября – начале октября, когда температура в почве на глубине обитания почек возобновления опускалась до +2 °С, ткани характеризовались сравнительно высоким уровнем ЦК и низким – АБК (табл. 4). Это можно рассматривать как результат морфогенетических процессов в тканях почек возобновления в осеннее время, когда закладываются ткани и органы в конусе нарастания побега. Высокий уровень ЦК может способствовать фор-

мообразовательным процессам, связанным с начальными этапами органогенеза – пролиферация и дифференциация клеток и органелл. Подобные результаты были получены для подземных почек длиннокорневищных растений мяты перечной [1] и канареечника тростниковидного [15]. Кроме того, ЦК могут повышать холодоустойчивость растений, регулируя активность белоксинтезирующего аппарата [16] и активацию ферментов антиоксидантной защиты [17].

В начале зимы, когда снежный покров составляет около 30 см, а температура в почве на глубине 10–12 см минус 0,3 °С, наблюдали увеличение соотношения АБК/ЦК выше единицы, что свидетельствует о превалировании ингибитора роста и гормона покоя – АБК. Следовательно, морфообразовательные процессы с участием гормонов роста ЦК, ИУК в тканях почек возобновления могут осуществляться до глубокой осени и появления устойчивого снежного покрова.

Почки возобновления *H. sosnowskyi* окружены многослойными покровными чешуями,

Таблица 3 / Table 3
Содержание свободных аминокислот и амидов в почках возобновления *H. sosnowskyi* в октябре
Free amino acids and amides content in *H. sosnowskyi* buds in October

Аминокислоты, амиды Amino acids and amides	Содержание, мг/г сухой массы Content, mg/g DW
Аспарагиновая / Aspartic acid	0,92
Треонин / Threonine	0,27
Серин / Serin	0,32
Аспарагин / Asparagine	16,25
Глутаминовая / Glutamic acid	0,94
Глутамин / Glutamine	31,00
Пролин / Proline	0,71
Глицин / Glycine	0,03
Аланин / Alanin	0,38
Цитрулин / Citrulline	0,02
Валин / Valin	0,52
Изолейцин / Isoleucine	0,25
Лейцин / Leucine	0,16
Тирозин / Tyrosine	0,29
Фенилаланин / Phenylalanine	0,10
β-аланин / β-alanine	0,01
γ-аминомасляная / γ-aminobutyric acid	0,38
Орнитин / Ornithine	0,01
Лизин / Lysine	0,03
Гистидин / Histidine	0,24
Аргинин / Arginine	0,81
Сумма аминокислот / The sum of amino acids	53,63
Мочевина / Urea	72,02
Азот мочевины / Urea Nitrogen	33,57

Таблица 4 / Table 4

Концентрация фитогормонов в почках возобновления *H. sosnowskyi* в осенне-зимний период, мг/г сухой массы / Concentration of phytohormones in *H. sosnowskyi* buds in the autumn-winter period, mg/g DW

Концентрация фитогормонов Phytohormone concentration	28 сентября 2020 г. September 28, 2020	17 декабря 2019 г. December 17, 2019
АБК / Abscisic acid	212,1±7,3	501,5±116,4
ИУК / Indolylacetic acid	165,8±12,5	183,2±17,0
ЦК / Cytokinins	415,6±7,4	295,2±7,9
АБК/ЦК / Abscisic acid/Cytokinins	0,5	1,7

Таблица 5 / Table 5

Содержание и соотношение хлорофиллов (Хл) и каротиноидов (Кар) в почках возобновления растений *Heracleum sosnowskyi* в осенний период, мг/г сухой массы
The content and ratio of chlorophylls (Chl) and carotenoids (Car) in *Heracleum sosnowskyi* buds in autumn, mg/g DW

Почки возобновления Buds	Хл a / Chl a	Хл b / Chl b	Хл (a + b) Chl (a + b)	Хл a/Хл b Chl a/Chl b	Кар / Car	Хл/Кар Chl/Car
Зелёные / Green	0,75±0,11 ^a	0,30±0,06 ^a	1,05±0,17 ^a	2,24±0,17 ^a	0,28±0,04 ^a	3,80±0,20 ^a
Красно-бурые Red-brown	0,12±0,02 ^b	0,12±0,02 ^b	0,24±0,04 ^b	1,06±0,04 ^b	0,10±0,02 ^b	2,30±0,06 ^b
Жёлтые / Yellow	0,05±0,01 ^b	0,04±0,01 ^b	0,09±0,01 ^b	1,13±0,01 ^{ab}	0,06±0,01 ^b	1,50±0,02 ^c

Примечание: Приведены среднее значение ± стандартная ошибка; разные надстрочные символы (a, b, c) обозначают значимость изменений параметра (тест Дункана, при p<0,05).

Note: The average value ± standard error is given; different superscript characters (a, b, c) indicate the significance of the differences (Duncan test, p<0.05).

которые защищают меристематические ткани побега от механических повреждений и низких температур. При подготовке к перезимовке растения формировали разнокачественные почки возобновления, отличающиеся по окраске покровных чешуй: зелёные, красно-бурые и жёлтые.

Почки с зелёными покровными чешуями накапливали наибольшее количество хлорофиллов и каротиноидов (табл. 5). В начале октября, когда температура почвы снижалась до 5–6 °С, ткани покровных чешуй зелёных почек возобновления содержали в среднем 1 мг хлорофиллов (Хл) на грамм сухой массы. Содержание хлорофиллов в красно-бурых и жёлтых почках было ниже в 5 и 10 раз соответственно. При этом соотношение Хл a и Хл b было близко к 1.

Судя по соотношению Хл/Кар, доля каротиноидов увеличивалась в ряду жёлтые > красно-бурые > зелёные почки. Сумма каротиноидов (Кар) в зелёных почках возобновления была выше по сравнению с красно-бурыми и жёлтыми и составляла в среднем 0,3 мг/г сухой массы. Каротиноиды, являясь соединениями липидной природы с ненасыщенными двойными связями, увеличивают гибкость мембран хлоропластов, что важно для функционирования фотосинтетического аппарата

при пониженных температурах [18, 19]. Это позволяет растениям своевременно завершить процесс закаливания и уйти под снег в зелёном состоянии.

Зелёные почки возобновления *H. sosnowskyi* сопоставимы по содержанию пигментов с зеленеющими верхушками сарментов *Achillea millefolium*, у которых отмечали формирование хлоропластов с развитой гранальной системой [11]. Жёлтые и красно-бурые почки возобновления *H. sosnowskyi* сравнимы по содержанию хлорофилла с этиолированными верхушками корневищ *A. millefolium*, которые характеризуются слабо развитой мембранной системой хлоропластов, представленной одиночными тилакоидами. Почки со слабо развитым пигментным комплексом могут быть меристематическим резервом в ценопопуляциях *H. sosnowskyi* на Севере.

Заключение

Получены оригинальные данные по структурным и физиолого-биохимическим адаптациям почек возобновления *H. sosnowskyi* в осенний период в условиях Севера. Почки возобновления покрыты многослойными почечными чешуями, втягиваются в почву на глубину 8–10 см. Температура замерзания

воды в тканях почек возобновления в октябре составляла минус 12 °С при сохранении высокой оводнённости (более 80%). Осенью в тканях почек возобновления поддерживаются активные формообразовательные процессы, о чём говорит сравнительно высокая эффективность дыхания меристематических тканей при низкой положительной температуре (2–5 °С). В тканях почек возобновления обнаружено накопление фитогормонов роста цитокининов, ИУК поздно осенью, что способствует росту и морфообразовательным процессам в меристематических тканях до появления устойчивого снежного покрова. В начале зимы наблюдали увеличение АБК – ингибитора роста и гормона покоя и снижение уровня ЦК. Показано формирование разнокачественных почек возобновления, различающихся по уровню содержания фотосинтетических пигментов. Наибольшее количество хлорофиллов и каротиноидов накапливали почки с зелёными покровными чешуями, наименьшее – с красно-бурными и жёлтыми. Почки с зелёными покровными чешуями имеют более развитый фотосинтетический аппарат и могут отрастать ранней весной ещё под снегом. Накопление каротиноидов в тканях зелёных почек возобновления защищает сформированный фотосинтетический аппарат в условиях низких температур при перезимовке. Полученные результаты по функциональному состоянию почек возобновления *H. sosnowskyi* в природных ценопопуляциях свидетельствуют об отсутствии глубокого покоя у растений, а морфообразовательные процессы в меристемах ограничиваются лишь зимними температурами.

Авторы благодарят д. б. н. Л.Б. Высоцкую (лаборатория физиологии растений, УИБ УФИЦ РАН) за определение фитогормонов.

Исследование выполнено в рамках НИОКТР «Фотосинтез, дыхание и биоэнергетика растений и фототрофных организмов (физиолого-биохимические, молекулярно-генетические и экологические аспекты)» (№ 122040600021-А).

Литература

1. Кондратьева В.В., Кириченко Е.Б., Сафронова Л.М., Воронкова Т.В. Фитогормоны корневищ мяты различного географического происхождения в годичном цикле её развития // Известия АН. Серия биологическая. 2000. № 5. С. 563–568.
2. Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Golovko T.K. Seasonal changes in growth and meta-

bolic activity of underground shoots of yarrow // Russ. J. Plant Physiol. 2013. V. 60. P. 821–829. doi: 10.1134/S1021443713060071

3. Malyshev R.V., Shelyakin M.A., Golovko T.K. Bud dormancy breaking affects respiration and energy balance of bilberry shoots in the initial stage of growth // Russ. J. Plant Physiol. 2016. V. 63. P. 409–416. doi: 10.1134/S1021443716030092

4. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhiy I.G., Malyshev R.V., Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Golovko T.K. Traits of *Heracleum sosnowskyi* plants in monostand on invaded area // PLoS ONE. 2015. V. 10 (11). Article No. e0142833. doi: 10.1371/journal.pone.0142833

5. Скупченко Л.А. Семеноведение борщевика на Севере. Л.: Наука, 1989. 119 с.

6. Dalke I.V., Chadin I.F., Malyshev R.V., Zakhozhiy I.G., Tishin D.V., Kharevsky A.A., Solod E.G., Shaikina M.N., Popova M.Y., Polyudchenkov I.P., Tagunova I.I., Lyazev P.A., Belyaeva A.V. Laboratory and field assessment of the frost resistance of Sosnowsky's hogweed // Russ. J. Biol. Invasions. 2020. V. 11. No. 1. P. 9–20. doi: 10.1134/S2075111720010026

7. Безделев А.Б., Безделева Т.А. Жизненные формы семенных растений российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 295 с.

8. Hansen L.D., Hopkin M.S., Rank D.R., Anekonda T.S., Breidenbach R.W., Criddle R.S. The relation between plant growth and respiration: A thermodynamic model // Planta. 1994. V. 194. P. 77–85. doi: 10.1007/BF00201037

9. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Veselov S.Y., Dodd I.C., Kudoyarova G.R. ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat // Funct. Plant Biol. 2009. V. 36. No. 1. P. 66–72. doi: 10.1007/s11738-016-2127-5

10. Vysotskaya L.B., Trekozova A.W., Kudoyarova G.R. Effect of phosphorus starvation on hormone content and growth of barley plants // Acta Physiol. Plant. 2016. V. 38. Article No. 108. doi: 10.1007/s11738-016-2127-5

11. Маслова С.П., Дымова О.В., Плюснина С.Н. Изменение ультраструктуры пластид и пигментного комплекса в процессе морфогенеза подземных побегов *Achillea millefolium* (Asteraceae) // Ботанический журнал. 2019. Т. 104. С. 1727–1739. doi: 10.1134/S0006813619110127

12. Головки Т.Г., Далькэ И.В., Табаленкова Г.Н., Гармаш Е.В. Дыхание растений Приполярного Урала // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 8. С. 1216–1226.

13. Гармаш Е.В., Маслова С.П., Далькэ И.В., Плюснина С.Н. Сравнительное исследование роста, фотосинтеза и дыхания некоторых бореальных видов в условиях средней и крайне-северной тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 2. С. 91–100. doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-091-100

14. Далькэ И.В., Малышев Р.В., Маслова С.П. Экофизиология дыхания растений *Heracleum sosnowskyi* в условиях севера // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 77–82. doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-077-082

15. Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Kurenkova S.V., Plusnina S.N. Seasonal changes in anatomical and morphological structure and the content of phytohormones and sugars in underground shoots of a long-rhizome perennial grass *Phalaroides arundinacea* // Russ. J. Plant Physiol. 2007. V. 54. No. 4. P. 491–497. doi: 10.1134/S1021443707040097

16. Титов А.Ф., Таланова В.В. Устойчивость растений и фитогормоны. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 206 с.

17. Romanov G.A. How do cytokinins affect the cell? // Russ. J. Plant Physiol. 2009. V. 56. P. 268–290. doi: 10.1134/S1021443709020174

18. Havaux M. Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts // Trends Plant Sci. 1998. V. 3. No. 4. P. 147–151. doi: 10.1016/S1360-1385(98)01200-X

19. Strzałka K., Kostecka-Gugała A., Latowski D. Carotenoids and environmental stress in plants: significance of carotenoid-mediated modulation of membrane physical properties // Russ. J. Plant Physiol. 2003. V. 50. No. 2. P. 168–172. doi: 10.1023/A:1022960828050

References

1. Kondrat'eva V.V., Kirichenko E.B., Safronova L.M., Voronkova T.V. Phytohormones of rhizomes of the mint of various geographic origin in its annual developmental cycle // Izv. Akad. Nauk. Ser. Biol. 2000. V. 27. No. 5. P. 563–568 (in Russian).

2. Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Malyshev R.V., Golovko T.K. Seasonal changes in growth and metabolic activity of underground shoots of yarrow // Russ. J. Plant Physiol. 2013. V. 60. P. 821–829. doi: 10.1134/S1021443713060071.

3. Malyshev R.V., Shelyakin M.A., Golovko T.K. Bud dormancy breaking affects respiration and energy balance of bilberry shoots in the initial stage of growth // Russ. J. Plant Physiol. 2016. V. 63. P. 409–416. doi: 10.1134/S1021443716030092

4. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhiy I.G., Malyshev R.V., Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Golovko T.K. Traits of *Heracleum sosnowskyi* plants in monostand on invaded area // PLoS ONE. 2015. V. 10 (11). Article No. e0142833. doi: 10.1371/journal.pone.0142833

5. Skupchenko L.A. Seed science of hogweed in the North. Leningrad: Nauka, 1989. 119 p. (in Russian).

6. Dalke I.V., Chadin I.F., Malyshev R.V., Zakhozhiy I.G., Tishin D.V., Kharevsky A.A., Solod E.G., Shaikina M.N., Popova M.Y., Polyudchenkov I.P., Tagunova I.I., Lyazev P.A., Belyaeva A.V. Laboratory and field assessment of the frost resistance of Sosnowsky's hogweed // Russ. J. Biol. Invasions. 2020. V. 11. No. 1. P. 9–20. doi: 10.1134/S2075111720010026

7. Bezdelev A.B., Bezdeleva T.A. Life forms of seed plants of the Russian Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 295 p. (in Russian).

8. Hansen L.D., Hopkin M.S., Rank D.R., Anekonda T.S., Breidenbach R.W., Criddle R.S. The relation between plant growth and respiration: A thermodynamic model // Planta. 1994. V. 194. P. 77–85. doi: 10.1007/BF00201037

9. Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Veselov S.Y., Dodd I.C., Kudoyarova G.R. ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat // Funct. Plant Biol. 2009. V. 36. No. 1. P. 66–72. doi: 10.1071/FP08187

10. Vysotskaya L.B., Trekozova A.W., Kudoyarova G.R. Effect of phosphorus starvation on hormone content and growth of barley plants // Acta Physiol. Plant. 2016. V. 38. Article No. 108. doi: 10.1007/s11738-016-2127-5

11. Maslova S.P., Dymova O.V., Plyusnina S.N. Ultrastructure of plastids and pigment complex in underground shoots of *Achillea millefolium* (Asteraceae) during their morphogenesis // Botanicheskii zhurnal. 2019. V. 104. No. 11. P. 1727–1739 (in Russian). doi: 10.1134/S0006813619110127

12. Golovko T.G., Dalke I.V., Tabalenkova G.N., Garmash E.V. Respiration of the subpolar Urals plants // Botanicheskii zhurnal. 2009. V. 94. No. 8. P. 1216–1226 (in Russian).

13. Garmash E.V., Maslova S.P., Dalke I.V., Plusnina S.N. Comparative study of growth, photosynthesis and respiration of several boreal species under the conditions of the north and extreme-north taiga // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 91–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-091-100

14. Dalke I.V., Malyshev R.V., Maslova S.P. Ecophysiology of *Heracleum sosnowskyi* plant respiration in the north // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 77–82 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-077-082

15. Maslova S.P., Tabalenkova G.N., Kurenkova S.V., Plusnina S.N. Seasonal changes in anatomical and morphological structure and the content of phytohormones and sugars in underground shoots of a long-rhizome perennial grass *Phalaroides arundinacea* // Russ. J. Plant Physiol. 2007. V. 54. No. 4. P. 491–497. doi: 10.1134/S1021443707040097

16. Titov A.F., Talanova V.V. Plant resistance and phytohormones. Petrozavodsk: KarSC RAS, 2009. 206 p. (in Russian).

17. Romanov G.A. How do cytokinins affect the cell? // Russ. J. Plant Physiol. 2009. V. 56. P. 268–290. doi: 10.1134/S1021443709020174

18. Havaux M. Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts // Trends Plant Sci. 1998. V. 3. No. 4. P. 147–151. doi: 10.1016/S1360-1385(98)01200-X

19. Strzałka K., Kostecka-Gugała A., Latowski D. Carotenoids and environmental stress in plants: significance of carotenoid-mediated modulation of membrane physical properties // Russ. J. Plant Physiol. 2003. V. 50. No. 2. P. 168–172. doi: 10.1023/A:1022960828050

Некоторые особенности биологии редкого эндемичного вида *Arafoe aromatica* Pimenov & Lavrova на территории Ритцинского реликтового национального парка (Республика Абхазия)

© 2024. Л. М. Абрамова¹, д. б. н., профессор, г. н. с.,
И. В. Тания^{2,3}, к. б. н., с. н. с., доцент, А. Н. Мустафина¹, к. б. н., с. н. с.,

¹Южно-Уральский ботанический сад-институт
Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, корп. 3,
²Абхазский государственный университет,
384904, Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Университетская, д. 1,
³Ритцинский реликтовый национальный парк,
384850, Республика Абхазия, г. Гудаута, ул. Лакрба, д. 1,
e-mail: alfverta@mail.ru

Впервые изучены особенности биологии редкого эндемичного вида Кавказа *Arafoe aromatica* в Ритцинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия). Определили возрастную, виталитетную структуру ценопопуляций и изменчивость морфометрических параметров. Исследование проведено стандартными методами популяционной биологии. Изменчивость морфометрических параметров изучали на 25 средневозрастных растениях в каждой ценопопуляции. Плотность ценопопуляций низкая (1–2,6 экз./м²). По классификации «дельта-омега» одна ценопопуляция является переходной, одна – зрелой. Большая часть морфологических признаков характеризуется нормальной степенью варьирования (14,7–37,0%). Виталитетный анализ показал, что одна ценопопуляция процветающая, другая – депрессивная. Состояние изученных ценопопуляций *A. aromatica* удовлетворительное. Антропогенные нарушения приводят к снижению численности и семенной продуктивности, ухудшению условий прорастания семян и процессов возобновления. Для сохранения редкого вида необходимо ограничить антропогенную нагрузку в местах произрастания, запретить сбор растений населением, осуществлять мониторинг и контроль за состоянием ценопопуляций.

Ключевые слова: Республика Абхазия, редкий вид, эндемик, *Arafoe aromatica*, ценопопуляция, возрастная структура, изменчивость, виталитет.

Some features of the rare endemic *Arafoe aromatica* Pimenov & Lavrova biology in Ritsa Strict Nature Reserve (Republic of Abkhazia)

© 2024. L. M. Abramova¹ ORCID: 0000-0002-3196-2080¹
I. V. Taniya^{2,3} ORCID: 0000-0001-6049-7619², A. N. Mustafina¹ ORCID: 0000-0001-9163-177X³

¹South-Ural Botanical Garden–Institute of Ufa Federal research
Center of Russian Academy of Sciences (BGI USC RAS),
195/3, Mendeleev St., Ufa, Russia, 450080,
²Abkhazian State University,
1, Universitetskaya St., Suhum, Abkhazia Republic, 384904,
³Ritsinsky Relic National Park,
1, Laktuba St., Gudauta, Republic of Abkhazia, 384850,
e-mail: alfverta@mail.ru

For the first time, the features of rare endemic species of Caucasus *Arafoe aromatica* biology in the Ritsa Strict Nature Reserve (Republic of Abkhazia) were studied. The age, vitality structure of coenopopulations (CP) and the variability of morphometric parameters were determined. The study was carried out using standard methods of population biology. The variability of morphometric parameters was studied on 25 middle-aged plants in each CP. The CP density is low (1–2.6 ind./m²). According to the delta-omega classification, one CP is transitional, and one is mature. Most of the morphological features are characterized by a normal degree of variation (14.7–37.0%). Vitality analysis showed that one CP is prosperous, the other is depressed. The state of the studied *A. aromatica* coenopopulations is satisfactory.

Anthropogenic disturbances lead to a decrease in the number and seed productivity, worsening conditions for seed germination and renewal processes. To preserve the rare species, it is necessary to limit the anthropogenic load in the places of growth, prohibit the collection of plants by the population, monitor and control the CP state.

Keywords: Republic of Abkhazia, rare species, endemic, *Arafoe aromatica*, coenopopulation, age structure, variability, vitality.

Растительный мир – важнейшая составляющая биоразнообразия в целом, и его охране уделяется большое внимание. Исчезновение любой популяции редких и исчезающих видов растений, а тем более всего биологического вида – невосполнимая утрата для биоразнообразия и безвозвратно потерянные «шансы» для человечества. Для перспективного существования редких видов растений необходимы знания об их распространении, экологии, современном состоянии популяций, и практические мероприятия, направленные на изучение и сохранение биоразнообразия растений, в частности, мониторинг популяций редких видов, который предполагает организацию сложной системы наблюдений на организменном, популяционно-видовом, ценоотическом уровнях организации живого [1].

Горные территории – особенные экосистемы, характеризующиеся высоким биологическим разнообразием и сосредоточением редких и эндемичных видов растений [2]. Они в наибольшей степени подвержены угрозе потери флористического разнообразия при антропогенных и климатических изменениях. Из всех компонентов горных экосистем наиболее уязвимы эндемичные виды, поскольку малые размеры ареала, низкая численность популяций и узкие экологические ниши делают их особенно чувствительными к изменениям окружающей среды и антропогенной нагрузке [3–7].

Мы проводим изучение особенностей биологии и экологии редких видов растений горных территорий, включая эндемичные виды: на Урале [8–10] и на Кавказе – на территории Ричинского реликтового национального парка (РРНП) (Республика Абхазия, Западный Кавказ) [3, 11, 12]. Территория парка подвержена рекреационной и пастбищной нагрузке, поскольку высокогорные субальпийские луга используются в качестве летних пастбищ для скота с глубокой древности [11, 12] и являются основой скотоводства Гудаутского района Абхазии. Это предопределяет сильное антропогенное влияние на травяные сообщества [12]. К числу редких и малоизученных видов растений Ричинского реликтового национального парка относится *Arafoe aromatica*

Pimenov & Lavrova (арафое ароматная) из семейства Ариасеае. В некоторых литературных источниках вид указан как *Ligusticum arafoe* Albov (лигустикум арафе) [13]. Это стенотопный реликтовый эндемик Северной Колхиды с сокращающейся численностью и биотопами. Включён в Красную книгу Российской Федерации (РФ) [14] (категория 3 – редкий вид) и Красные книги Краснодарского края и Республики Адыгея (категория 2 – уязвимые). Охраняется на территории Кавказского заповедника [14], в Сочинском национальном парке [15]. Сведения о виде в литературных источниках отрывочны и малочисленны.

На Кавказе известно около 20 местонахождений вида, с общей численностью около 40–60 тыс. экз. Ареал вида охватывает Краснодарский край, Республику Адыгея; встречается в составе субальпийских лугов на вершинах Аутль, Амуко, Фишт, Чугуш, хребтах Псехако, Аишхо, Аибга. В Сочинском национальном парке встречается небольшими группами, численность популяций варьирует от 30 до 300 особей [15]. Значительная часть ареала вида находится в Республике Абхазия.

Цель исследования – изучить особенности возрастной структуры, морфометрических параметров и виталитетной структуры ценопопуляций (ЦП) редкого вида *A. aromatica* в Ричинском реликтовом национальном парке в условиях антропогенной нагрузки.

Объекты и методы исследования

Arafoe aromatica – многолетнее травянистое поликарпическое растение, густо опушённое длинными волосками, высотой до 1 м. Стебли прямые, гранистые, опушённые. Прикорневые листья на длинных черешках, цельные с округло-сердцевидной пластинкой, по краям неровно-зубчатой, наверху тройчатосложные из косо-яйцевидных листочков. Нижние стеблевые листья сложные, из трёх листочков, сходные с прикорневыми листьями. Верхние листья более мелкие, на коротких черешках, расширенных во влагалище. Все листья сверху голые, зелёные, снизу серовато опушённые. Зонтики с 20–40 лучами, обёртка из 5–11 неравных, линейных листочков. Лепестки белые,

наверху выемчатые, на спинке опушённые. Размножение преимущественно семенное. Встречается в субальпийских высокоотравных лугах, пихтовых лесах и берёзовых криволесях у верхней границы леса [16].

Изучение биологии и структуры популяций редкого вида *A. aromatica* на территории РРНП проводилось в 2016–2017 гг., в пределах Ауадхарского лесничества. До проведения наших исследований на территории РРНП вид был описан А.А. Колаковским [13] в верхнелесном и альпийском поясах (1700–2100 м над ур. м.). Приурочен к опушкам, щебнистым склонам, высокоотравным лугам. Произрастает в основном на выпасаемых участках, вдоль туристических троп. Онтогенез данного вида и возрастная структура популяций, а также биологические особенности вида ранее не изучались.

Нами было обследовано 2 местообитания с различной степенью антропогенной нагрузки: 1) урочище Каменистая поляна (средняя часть юго-западного склона (уклон 30–40°), 500 м от перевала Пыв, на высоте 2012 м над ур. м. (N 43°28.905' E 040° 42.209'), антропогенная нагрузка слабая; 2) урочище Аджарра (южный склон подножья г. Аджарра, на высоте 1864 м над ур. м. (N 43°32.604' E 040° 38.711'), антропогенная нагрузка средняя.

Для изучения плотности и демографической структуры в каждой из ЦП закладывалось 25 учётных площадок размером 1 м². Определялись основные популяционные характеристики: общая и эффективная плотность особей, возрастная структура [17]. На основании полученных данных построены онтогенетические спектры ЦП.

Для характеристики онтогенетической структуры ЦП использовали общепринятые демографические показатели. Тип ЦП определяли по классификациям, представленным в работе [17], и классификации «дельта–омега» [18], основанной на совместном использовании индексов возрастности (Δ) и эффективности (ω).

Особенности морфометрических параметров выявляли по методу [19] на 25 средневозрастных генеративных особях. Наблюдения и измерения проводились в фазу цветения, при этом учитывались 20 параметров. В соцветии учитывали: простой зонтик (центральный – 1-го, боковые – 2-го порядка), число зонтичков в простом зонтике, число цветков в 1 зонтичке и их диаметры, что стандартно при изучении репродуктивных показателей видов семейства зонтичных.

Исследование виталитетной структуры популяций проводилось по методике [1]. Для оценки виталитета популяций по каждому виду из ряда параметров с применением корреляционного и факторного анализа был выделен детерминирующий комплекс признаков растений в среднем генеративном состоянии: высота вегетативно-генеративного побега и число цветков в зонтичке зонтика второго порядка. Для обработки полученных данных составлены виталитетные спектры, также определён индекс качества и виталитетный тип ценопопуляции.

Статистическая обработка данных выполнена с применением программ MS Excel 2010 с использованием стандартных показателей. Шкала степени варьирования коэффициента вариации приведена по методике [20].

Результаты и обсуждение

Общая и эффективная плотность отличаются незначительно: общая – 2,6 экз./м² в ЦП 1 и 2,5 экз./м² в ЦП 2, эффективная – 1,7 экз./м² в ЦП 1 и 2,5 экз./м² в ЦП 2 (табл. 1). Прегенеративная фракция выше в ЦП 1 (35,9%), здесь же наибольшее количество постгенеративных особей (14,1%), на генеративную фракцию приходится 50,0%. В ЦП 2 максимальна генеративная фракция – 69,4%, особи постгенеративной фракции полностью отсутствуют, на прегенеративную фракцию приходится 30,6%.

Согласно классификации [16], изученные ЦП *A. aromatica* являются нормальными неполночленными с максимумом на среднегенеративных особях (рис. 1). Отсутствие в спектре проростков и сенильных особей является наиболее типичным. Проростки первыми реагируют на неблагоприятные условия произрастания, также их бывает трудно обнаружить в густом травостое. Выпадение сенильных особей, видимо, связано с сокращением онтогенеза за счёт отмирания растений в старовозрастном генеративном состоянии.

В обеих обследованных ценопопуляциях, которые произрастают в условиях периодических нарушений (выпас скота, рекреация), наблюдается центрированный онтогенетический спектр. Пик приходится на средневозрастные генеративные особи (в ЦП 1 – 35,9%, в ЦП 2 – 48,4%). Доля ювенильных и виргинильных особей выше в ЦП 1 – 3,1 и 25,6% соответственно (в ЦП 2 аналогичные показатели 1,6 и 21,0%), предположительно, потому

Таблица 1 / Table 1

Показатели плотности, онтогенетический состав, тип и демографические показатели состояния ЦП *Arafoe aromatica* / Density indices, ontogenetic composition, and demographic indices of the CP state of *Arafoe aromatica*

Номер ЦП No. of CP	Эффективная плотность, экз./м ² Effective density, ind./m ²	Плотность, экз./м ² Density, ind./m ²	Онтогенетическое состояние, % Ontogenetic state, %			Демографические показатели Demographic indicators				
			j+im+v	g ₁ +g ₂ +g ₃	ss	Δ	ω	Тип ЦП Type of CPs	I _B I _{Rec}	I _{CT} I _{Age}
1	1,7	2,6	35,9	50,0	14,1	0,41	0,65	переходная transitional	0,72	0,22
2	1,9	2,5	30,6	69,4	0	0,36	0,75	зрелая mature	0,44	0,06

Примечание: номер ЦП соответствует описанию в разделе «Объекты и методы исследования». Онтогенетические состояния: j – ювенильное, im – имматурное, v – виргинильное, g₁ – молодое генеративное, g₂ – средневозрастное генеративное, g₃ – старовозрастное генеративное, ss – субсенильное. I_B – индекс восстановления, I_{CT} – индекс старения.
 Note: the CP number corresponds to the description in the section “Objects and methods of research”. Ontogenetic states: j – juvenile, im – immature, v – virginile, g₁ – young generative, g₂ – middle-age generative, g₃ – old-age generative, ss – sub-senile. I_{Rec} – recovery index, I_{Age} – aging index.

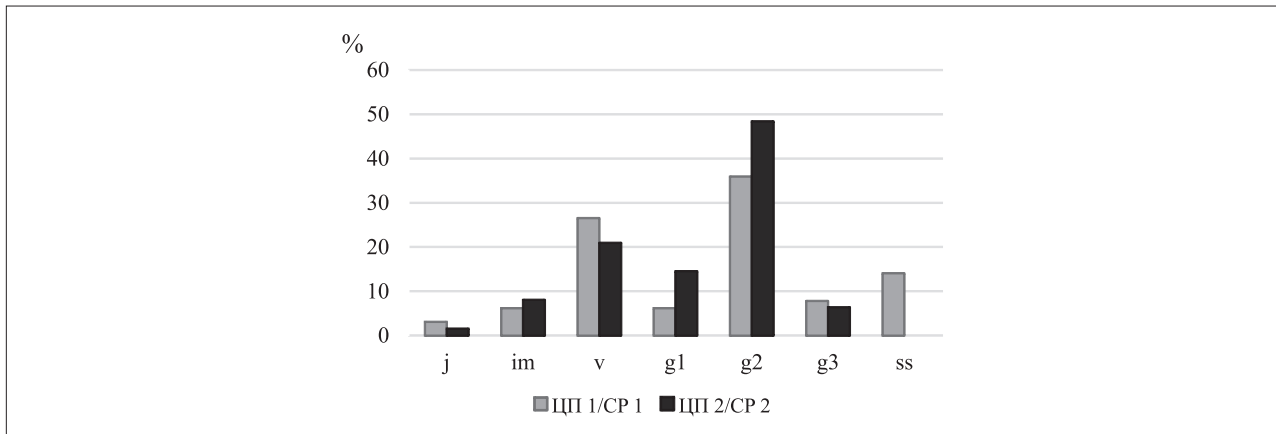


Рис. 1. Онтогенетические спектры ценопопуляций *A. aromatica*. По оси x – онтогенетическое состояние: j – ювенильное, im – имматурное, v – виргинильное, g₁ – молодое генеративное, g₂ – средневозрастное генеративное, g₃ – старовозрастное генеративное, ss – субсенильное; по оси y – доля особей данного онтогенетического состояния, %
 Fig. 1. Ontogenetic spectrum of *A. aromatica* coenopopulations (CP). X-axis – ontogenetic state: j – juvenile, im – immature, v – virginal, g₁ – young generative, g₂ – middle-aged generative, g₃ – old-age generative, ss – sub-senile; y-axis – the proportion of individuals of this ontogenetic state, %

что данная ЦП произрастает чуть в стороне от основного потока туристов, и особи прегенеративного состояния в меньшей степени подвергаются антропогенному воздействию. С этим же, видимо, связано и наличие особей субсенильного состояния (14,1%) в этой ЦП. В ЦП 2 больше имматурных особей – 8,1% (в ЦП 1 – 6,3%), видимо, в год исследования (2017 г.), был более благоприятный период для этой фазы развития. Также здесь больше молодых и средневозрастных генеративных особей (14,5 и 48,4% соответственно), что говорит об устойчивости популяции к неблагоприятным условиям местообитания (поток туристов в месте произрастания).

По классификации «дельта-омега», ЦП 1 характеризуется как переходная (Δ = 0,41, ω =

0,65), где соотношение молодой и средневозрастной генеративной фракции примерно равно. Ценопопуляция 2 выявлена как зрелая (Δ = 0,36, ω = 0,75), здесь доля среднегенеративных особей преобладает над молодой фракцией. Различие в прегенеративной и постгенеративной фракции у ЦП находит отражение в индексах восстановления и старения. В ЦП 1 оба индекса (I_B – 0,72, I_C – 0,22) превышают аналогичные в ЦП 2 (I_B – 0,44, I_C – 0,06), что говорит о достаточно высокой способности поддерживать свою структуру хорошим возобновлением молодыми и присутствием старых особей.

Изучение морфометрических параметров в ЦП *A. aromatica* показало, что максимальные значения по большинству показателей имеет

Таблица 2 / Table 2

Внутрипопуляционная изменчивость морфометрических параметров *A. aromatica*
 Intrapopulation variability of morphometric parameters *A. aromatica*

Средние значения морфометрических параметров Average values of morphometric parameters	ЦП 1 CP 1	C _v , %	ЦП 2 CP 2	C _v , %	t _{факт}
Число вегетативно-генеративных побегов на одно растение, шт. Number of vegetative-generative shoots per plant, pcs.	1,4±0,1	45,2	1,6±0,2	54,1	0,641
Высота генеративного побега, см Generative shoot height, cm	79,0±2,4	15,0	74,8±3,0	20,0	1,144
Диаметр стебля, см / Stem diameter, cm	0,6±0,0	19,7	0,5±0,0	25,2	0,294
Число черешковых листьев, шт. Number of petiole leaves, pcs.	1,4±0,1	35,7	1,8±0,1	24,8	2,571*
Длина черешкового листа, см Leaf petiole length, cm	9,8±0,4	22,8	11,9±0,7	30,9	2,456*
Ширина черешкового листа, см Leaf petiole width, cm	13,7±0,6	23,5	15,1±0,7	22,9	1,465
Число сидячих листьев, шт. Number of sessile leaves, pcs.	3,5±0,1	20,3	3,7±0,2	23,2	0,699
Длина черешка, см / Petiole length, cm	12,6±1,1	45,6	12,6±0,9	34,6	0,072
Длина черешкового листочка, см Leaflet petiole length, cm	6,4±0,2	18,8	7,7±0,4	26,7	2,627*
Ширина черешкового листочка, см Leaflet petiole width, cm	5,5±0,3	23,1	6,5±0,3	22,9	2,270*
Число зонтиков первого порядка, шт. Number of first-order umbrellas, pcs.	1,1±0,1	37,0	1,0±0,0	0,0	1,002
Диаметр зонтиков первого порядка, см Diameter of first-order umbrellas, cm	4,7±0,1	14,7	4,6±0,3	29,1	0,544
Число зонтиков второго порядка, шт. Number of second-order umbrellas, pcs.	1,8±0,2	62,1	2,2±0,2	49,4	1,034
Диаметр зонтиков второго порядка, см Diameter of second-order umbrellas, cm	2,5±0,3	56,7	2,4±0,3	53,4	0,207
Число зонтиков в зонтике первого порядка, шт. Number of umbrellas in a first-order umbrella, pcs.	23,1±1,4	29,5	17,2±1,1	32,3	2,828*
Диаметр зонтиков в зонтике первого порядка, см Diameter of umbrellas in a first-order umbrella, cm	1,2±0,1	21,9	1,2±0,1	20,8	0,171
Число зонтиков в зонтике второго порядка, шт. Number of umbrellas in a second-order umbrella, pcs.	19,1±2,1	56,4	18,5±1,7	45,3	0,188
Диаметр зонтиков в зонтике второго порядка, см Diameter of umbrellas in a second-order umbrella, cm	0,5±0,1	56,1	0,5±0,1	52,4	0,053
Число цветков в зонтичке зонтика первого порядка, шт. / Number of flowers in the umbrella of the first-order umbrella, pcs.	26,3±1,0	19,4	20,0±0,9	24,2	2,989*
Число цветков в зонтичке зонтика второго порядка, шт. / Number of flowers in the umbrella of a second-order umbrella, pcs.	15,7±1,7	54,9	12,1±1,1	47,0	1,683

Примечание: C_v – коэффициент вариации, %. * – показатель достоверен при 5%-ном уровне значимости.
 Note: C_v – coefficient of variation, %. * – indicator is reliable at 5% significance level.

ЦП 1, расположенная на слабонарушенном склоне по дороге к перевалу, где достаточное увлажнение почвы и умеренное антропогенное воздействие формируют оптимальные условия произрастания. Наибольшие значения выявлены по высоте вегетативно-генеративного побега и диаметру его стебля (79,0 и 0,6 см),

числу и диаметру зонтиков первого порядка (1,1 шт. и 4,7 см), диаметру зонтиков второго порядка (2,5 см), числу зонтиков в зонтике первого и второго порядков (23,1 и 19,1 шт.) и числу цветков в зонтичках зонтиков первого и второго порядков (26,3 и 15,7 шт.). Все перечисленные признаки относятся к генератив-

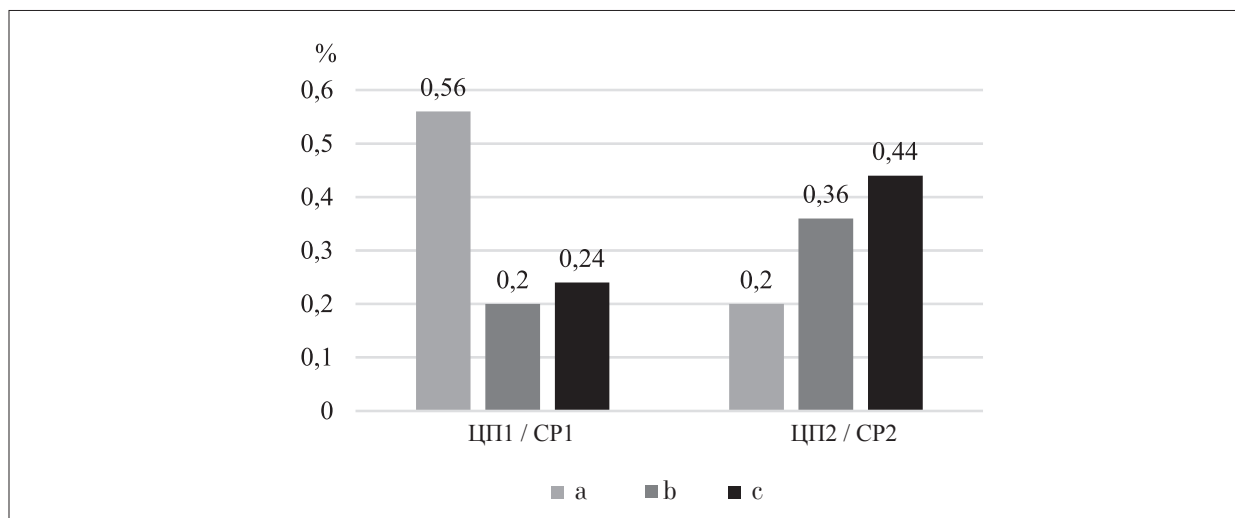


Рис. 2. Спектры виталитетного состава ценопопуляций *A. aromatica*. По оси *x* – ценопопуляция, по оси *y* – относительная частота размерных классов: *a* – особи высшего, *b* – особи промежуточного, *c* – особи низшего класса виталитета. Цифрами указана доля распределения особей по классам, %

Fig. 2. Spectra of the vitality composition of *A. aromatica* cenopopulations. *X*-axis – cenopopulation, *y*-axis – the relative frequency of the size classes: *a* – individuals of the highest, *b* – individuals of the intermediate, *c* – individuals of the lowest class of vitality. The numbers indicate the share of the distribution of individuals by class, %

ной сфере, видимо, лучше функционирующей в условиях слабонарушенных местообитаний.

Оценка коэффициента вариации выявила нормальную степень варьирования для большинства морфометрических признаков (14,7–37,0%). Небольшую изменчивость имеет число зонтиков первого порядка в ЦП 2 (0,0%). Значительное варьирование в обоих ЦП отмечено для таких признаков, как: число вегетативно-генеративных побегов (45,2 и 54,1%), число и диаметр зонтиков второго порядка (49,4 и 62,1%), число и диаметр зонтичков в зонтике второго порядка (45,3 и 56,4%) и число цветков в зонтичке зонтика второго порядка (54,9 и 47,0%). Высокой изменчивостью признаков обладают растения со значительной дифференциацией по морфоструктуре. Возможно, это проявление фенотипической пластичности и способность растения адаптироваться к условиям обитания.

Сравнение показателей морфометрических параметров по критерию Стьюдента между растениями в исследуемых ценопопуляциях выявило статистически значимые различия по мерным признакам: длина черешкового листа, длина и ширина черешкового листочка, а также по счётным признакам: число черешкового листа, число зонтичков в зонтике первого порядка и число цветков в зонтичках зонтиков первого порядка ($t_{\text{факт}} < 2,064$, показатель достоверен на 5% уровне значимости).

По результатам определения виталитетной структуры ЦП *A. aromatica* (рис. 2) выявля-

но, что жизненное состояние ЦП изменяется в зависимости от антропогенной нагрузки. В ЦП 1 преобладали особи высшего класса, и она оценена как процветающая. Критерий *Q* здесь максимален – 0,38. Возможно, на высокий уровень жизнестойкости отдельных особей благотворно влияют слабые нарушения экотопы. В ЦП 2 доминирующей была доля особей низшего класса (*c*), и она отнесена к депрессивным (*Q* – 0,28). Видимо, на фоне общего эколого-ценотического стресса, обусловленного антропогенной нагрузкой, значительно снижается рост и развитие особей.

Заключение

Проведённые исследования позволили впервые определить онтогенетическую и виталитетную структуру и состояние ценопопуляций редкого эндемика *A. aromatica*. Изучив две ценопопуляции вида на территории Ричинского реликтового национального парка, можно сказать, что в целом состояние этих популяций удовлетворительное, несмотря на невысокую антропогенную нагрузку, но плотность в ЦП довольно низкая (2,5–2,6 экз./м²). По классификации «дельта-омега» ЦП 1, расположенная по дороге к перевалу Пыв, которая в меньшей степени нарушена выпасом и рекреацией, является переходной, а более нарушенная ЦП 2, произрастающая у подножья г. Аджарра по дороге к Аджарским водопадам – зрелой. Результаты изучения

морфометрических параметров показали, что по большинству показателей лидирует ЦП 1, которая расположена в стороне от основного потока туристов, следовательно, в меньшей мере подвергается воздействию антропогенной нагрузки. Анализ рассчитанных коэффициентов вариации выявил нормальную степень изменчивости (14,7–37,0%). Определение виталитетной структуры показало, что наибольшая жизнеспособность характерна для ЦП 1 и она отнесена к категории процветающих, наименьшая – для ЦП 2, соответственно, она определена как депрессивная.

Антропогенные нарушения (в основном, выпас скота, вытаптывание туристами, а также сбор местным населением как ароматического растения) влияют на снижение численности популяций редкого вида из-за уплотнения почвы и обламывания побегов, что приводит к снижению семенной продуктивности, ухудшению условий прорастания семян, а также элиминации проростков и ювенильных растений. Тем не менее, *A. aromatica* в целом довольно устойчив к невысоким воздействиям, но практически исчезает в местах с сильным нарушением (сбои). Для сохранения вида необходимо ограничить антропогенную нагрузку в местах произрастания, запретить сбор растительного сырья населением, осуществлять мониторинг и контроль за состоянием популяций редкого вида *A. aromatica*.

Работа выполнена по теме ЮУБСИ УФИЦ РАН «Биоразнообразие природных систем и растительные ресурсы России: оценка состояния и мониторинг динамики, проблемы сохранения, воспроизводства, увеличения и рационального использования» в рамках государственного задания УФИЦ РАН № 122033100041-9.

Литература

1. Злобин Ю.А., Скляр В.Г., Клименко А.А. Популяции редких видов растений: теоретические основы и методы изучения. Сумы: Университетская книга, 2013. 439 с.
2. Горчаковский П.Л., Золотарева Н.В. Фиторазнообразие реликтовых степных анклавов на Урале: опыт сравнительной оценки // Экология. 2006. № 6. С. 415–424.
3. Пшегусов Р.Х., Чадаева В.А., Тания И.В., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н. Стратегия жизни и долгосрочная климатогенная динамика эндемичного кавказского вида *Fritillaria latifolia* Willd. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2019. Т. 161. № 4. С. 571–589. doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.571-589
4. Mazangi A., Ejtehad H., Mirshamsi O., Ghassemzadeh F., Hosseinianyousefkhani S.S. Effects of climate change

on the distribution of endemic *Ferula xylorhachis* Rech. f. (Apiaceae: Scandiceae) in Iran: Predictions from ecological niche models // Russian Journal of Ecology. 2016. V. 47. No. 4. P. 349–354. doi: 10.1134/S1067413616040123

5. Khanum R. Rarity of endemic medicinal plants and role of herbaria for their conservation against environmental challenges // Medicinal Plants and Environmental Challenges. Cham, Springer Publ., 2017. P. 49–68. doi: 10.1007/978-3-319-68717-9_3

6. Maděra P., Habrová H., Šenfeldr M., Kholová I., Lvončík S., Ehrenbergerová L., Roth M., Nadezhdina N., Němec P., Rosenthal J., Pavliš J. Growth dynamics of endemic *Dracaena cinnabari* Balf. f. of Socotra Island suggests essential elements for a conservation strategy // Biologia. 2018. V. 4. P. 1–11. doi: 10.2478/s11756-018-0152-0

7. Кириллова И.А., Дёгтева С.В., Дубровский Ю.А., Новаковский А.Б. Экология и структура ценопопуляций *Goodyera repens* (L.) R. Br. (Orchidaceae) на Северном Урале // Теоретическая и прикладная экология. 2019. V. 74. P. 339–349. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-069-077

8. Абрамова Л.М., Мустафина А.Н., Каримова О.А., Шигапов З.Х. Структура и состояние популяций трёх редких видов рода *Hedysarum* (Fabaceae) на Южном Урале // Ботанический журнал. 2019. Т. 104. № 5. С. 729–740. doi: 10.1134/S00068136190400211

9. Каримова О.А., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н., Голованов Я.М. Состояние ценопопуляций *Anthemis trotskiana* (Asteraceae) в Оренбургской области // Ботанический журнал. 2018. Т. 103. № 6. С. 740–754. doi: 10.1134/S0006813618060042

10. Юсупова О.В., Абрамова Л.М., Юсупов И.Р. Динамика популяций *Anemonastrum biarmense* (Ranunculaceae) в Южно-Уральском заповеднике (Республика Башкортостан) // Ботанический журнал. 2020. Т. 105. № 9. С. 861–877. doi: 10.31857/S0006813620090100

11. Тания И.В., Абрамова Л.М., Мустафина А.Н. О состоянии ценопопуляций эндемичных видов растений рода *Fritillaria* (*Fritillaria latifolia* Willd., *Fritillaria lagodechiana* Charkev.) в Рицинском реликтовом национальном парке // Труды Рицинского реликтового национального парка. 2017. Вып. 1. С. 59–69.

12. Tanija I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. On the state of populations of some rare species of the Ritsa Relict National Park // Takhtajania. 2018. V. 4. P. 61–67.

13. Колаковский А.А. Флора Абхазии. Тбилиси: Мецниереба, 1986. 68 с.

14. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / Под ред. Н.В. Бардунова, В.С. Новикова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 855 с.

15. Тимухин И.Н., Туниев Б.С. Атлас редких видов растений Сочинского национального парка и Сочинского Причерноморья // Научные труды Сочинского национального парка. № 11. Сочи: Оптима, 2018. 244 с.

16. Пименов М.Г., Лаврова Т.В. Ревизия видов *Ligusticum* (Apiaceae) флоры СССР и описание нового

рода *Arafoe* // Ботанический журнал. 1989. Т. 74. № 16. С. 96–103.

17. Воронцова Л.И., Гатцук Л.Е., Егорова В.Н., Ермакова И.М., Жукова Л.А., Заугольнова Л.Б., Курченко Е.И., Матвеев А.Р., Михайлов Т.Д., Просвирина Е.А., Смирнова О.В., Торопова Н.А., Фаликов Л.Д., Шорина Н.И., Уранов А.А. Ценопопуляции растений (основные понятия и структура) / Отв. ред. А.А. Уранов, Т.И. Серебрякова. М.: Наука, 1976. 217 с.

18. Животовский Л.А. Онтогенетические состояния, эффективная плотность и классификация популяций растений // Экология. 2001. № 1. С. 3–7.

19. Голубев В.Н. Основы биоморфологии травянистых растений центральной лесостепи. Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1962. 511 с.

20. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. 296 с.

References

1. Zlobin Yu.A., Sklyar V.G., Klimenko A.A. Populations of rare plant species: theoretical bases and methods of study. Sumy: Universitetskaya kniga, 2013. 439 p. (in Russian).

2. Gorchakovskij P.L., Zolotareva N.V. Phytodiversity of relict steppe enclaves in the Urals: Experience of comparative assessment // Ecology. 2006. No. 6. P. 415–424 (in Russian).

3. Pshegusov R.H., Chadaeva V.A., Tanija I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. Life strategies and long-term climate-driven dynamics of the endemic Caucasian plant *Fritillaria latifolia* Willd. // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki. 2019. V. 161. No. 4. P. 571–589 (in Russian). doi: 10.26907/2542-064X.2019.4.571-589

4. Mazangi A., Ejtahadi H., Mirshamsi O., Ghassemzadeh F., Hosseinianousefkhani S.S. Effects of climate change on the distribution of endemic *Ferula xylorhachis* Rech. f. (Apiaceae: Scandiceae) in Iran: Predictions from ecological niche models // Russian Journal of Ecology. 2016. V. 47. No. 4. P. 349–354. doi: 10.1134/S1067413616040123

5. Khanum R. Rarity of endemic medicinal plants and role of herbaria for their conservation against environmental challenges // Medicinal Plants and Environmental Challenges. Cham, Springer Publ., 2017. P. 49–68. doi: 10.1007/978-3-319-68717-9_3

6. Maděra P., Habrová H., Šenfeldr M., Kholová I., Lvončík S., Ehrenbergerová L., Roth M., Nadezhdina N., Němec P., Rosenthal J., Pavliš J. Growth dynamics of endemic *Dracaena cinnabari* Balf. f. of Socotra Island suggests essential elements for a conservation strategy // Biologia. 2019. V. 74. P. 339–349. doi: 10.2478/s11756-018-0152-0

7. Kirillova I.A., Dyogteva S.V., Dubrovsky Yu.A., Novakovskiy A.B. Ecology and structure of *Goodyera repens* (L.) R. Br. (Orchidaceae) cenopopulations in the Northern Urals // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 3. P. 69–77 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-069-077

8. Abramova L.M., Mustafina A.N., Karimova O.A., Shigapov Z.H. Structure and state of populations of three rare species of the genus *Hedysarum* (Fabaceae) in the South Urals // Botanical Journal. 2019. V. 104. No. 5. P. 729–740 (in Russian). doi: 10.1134/S00068136190400211

9. Karimova O.A., Abramova L.M., Mustafina A.N., Golovanov J.M. State of cenopopulations of *Anthemis trotzkiana* (Asteraceae) in the Orenburg region // Botanical Journal. 2018. V. 103. No. 6. P. 740–754 (in Russian). doi: 10.1134/S0006813618060042

10. Jusupova O.V., Abramova L.M., Jusupov I.R. Population dynamics of *Anemonastrum biarmense* (Ranunculaceae) in the South Ural Reserve (Republic of Bashkortostan) // Botanical Journal. 2020. V. 105. No. 9. P. 861–877 (in Russian). doi: 10.31857/S0006813620090100

11. Tanija I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. On the state of cenopopulations of endemic plant species from the genus *Fritillaria* (*Fritillaria latifolia* Willd., *Fritillaria lagodechiana* Charkev.) in the Ritsa relict national park // Proceedings of the Ritsinsky relict national park. 2017. V. 1. P. 59–69 (in Russian).

12. Tanija I.V., Abramova L.M., Mustafina A.N. On the state of populations of some rare species of the Ritsa Relict National Park // Takhtajania. 2018. V. 4. P. 61–67.

13. Kolakovskij A.A. Flora of Abkhazia. Tbilisi: Mecniereba, 1986. 68 p. (in Russian).

14. Red Data Book of the Russian Federation (plants and mushrooms) / Eds. N.V. Bardunov, V.S. Novikov. Moskva: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2008. 855 p. (in Russian).

15. Timuhin I.N., Tuniev B.S. Atlas of Rare Plant Species of the Sochi National Park and the Sochi Black Sea Region // Scientific Works of the Sochi National Park. No. 11. Sochi: Optima, 2018. 244 p. (in Russian).

16. Pimenov M.G., Lavrova T.V. Revision of the species *Ligusticum* (Apiacea) of the flora of the USSR and description of the new genus *Arafoe* // Botanical Journal. 1989. V. 74. No. 16. P. 96–103 (in Russian).

17. Vorontsova L.I., Gattsuk L.E., Egorova V.N., Eрмакова И.М., Zhukova L.A., Zaugolnova L.B., Kurchenko E.I., Matveev A.R., Mikhaylov T.D., Prosvirina E.A., Sмирнова О.В., Toropova N.A., Falikov L.D., Shorina N.I., Uranov A.A. Plant cenopopulations (basic concepts and structure) / Eds. A.A. Uranov, T.I. Serebryakova. Moskva: Nauka, 1976. 217 p. (in Russian).

18. Zhivotovskij L.A. Ontogenetic state, effective density and classification of populations // Ecology. 2001. No. 1. P. 3–7 (in Russian).

19. Golubev V.N. Basic of biomorphology of herbaceous plants of central forest steppe. No. 7. Works of the Central Black Earth Reserve named after V.V. Alekhin. Voronezh: Izdatelstvo Voronezhskogo universiteta, 1962. 511 p. (in Russian).

20. Zaytsev G.N. Mathematics in experimental biology. Moskva: Nauka, 1990. 296 p. (in Russian).

Биологическое загрязнение почв побочными продуктами животноводства

© 2024. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с.,

Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,

Е. П. Колеватых³, к. м. н., зав. кафедрой,

Т. Я. Ашихмина^{1,4}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

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

²Вятский государственный агротехнологический университет,

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

³Кировский государственный медицинский университет,

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

⁴Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

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

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

Побочные продукты животноводства (ППЖ) – навоз, навозные стоки (НС) – широко используются в качестве органических удобрений. Основным недостатком соответствующих удобрений является высокое содержание несвойственных незагрязнённым природным средам микроорганизмов (МО), включая патогенные. Используемые в настоящее время естественные методы обезвреживания ППЖ позволяют существенно снизить риски переноса патогенных и условно-патогенных МО в удобряемую почву, но не исключают их полностью. В рамках настоящей работы было изучено влияние долговременного (более 7 лет) внесения обезвреженной жидкой фракции (ЖФ) свиных НС и НС крупного рогатого скота (КРС) на химический состав и санитарно-гигиеническое состояние почвы пахотных полей и заросших лесом участков, расположенных на расстоянии 500 м от границ полей. Выполненные исследования показали, что длительное внесение ЖФ привело к увеличению содержания органического вещества, подвижного фосфора, калия и серы, повышению суммы поглощённых оснований, снижению обменной кислотности в пашне по сравнению с прилегающими лесными участками, однако санитарное состояние и пашни, и прилегающих территорий значительно ухудшилось. Во всех пробах почвы было выявлено существенное увеличение общего микробного числа (ОМЧ) по сравнению с нормативными показателями. Особенно высокие значения ОМЧ были установлены в почве, удобряемой ЖФ навоза КРС. Соответствующая почва характеризовалась самым высоким содержанием органического вещества и нейтральной реакцией среды, что обеспечивало благоприятные условия для активного развития сапрофитной микробиоты. Во всех отобранных образцах почвы выявлено свежее фекальное загрязнение. Почвы характеризуются как сильно загрязнённые. В соответствии с показателями индекса БГКП (бактерии группы кишечной палочки), энтерококков и *Clostridium perfringens* почвы всех обследованных участков относятся к умеренно опасным. Более высокие значения соответствующих индексов выявлены в пашне, удобряемой ЖФ свиных НС, и на прилегающих к пашням территориях. В процессе санитарно-бактериологических исследований яйца гельминтов в почве не были обнаружены.

Ключевые слова: побочные продукты животноводства, органические удобрения, санитарное состояние почв, биологическое загрязнение.

Biological contamination of soils by livestock by-products

© 2024. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146,
E. P. Kolevatykh³ ORCID: 0000-0001-6147-3555, T. Ya. Ashikhmina^{1,4} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Vyatka State University,

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

²Vyatka State Agrotechnological University,

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

³Kirov State Medical University,

112, K. Marksa St., Kirov, Russia, 610000,

⁴Institute 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

By-products of animal husbandry (BPAH) such as manure, manure effluents (ME) are widely used as organic fertilizers. The main disadvantage of the appropriate fertilizers is the high content of microorganisms (MO) untypical to uncontaminated natural environments, including pathogenic ones. Currently used natural methods of BPAH neutralization can significantly reduce the risks of transferring pathogenic and opportunistic MO into fertilized soil, but do not completely exclude them. The study examined the effects of long-term (more than 7 years) introduction of a neutralized liquid fraction (LF) of pork ME and cattle ME on the chemical composition and sanitary and hygienic condition of the soil of arable fields and wooded areas located at 500 m from the boundaries of the fields. Prolonged application of LF led to an increase in the content of organic matter, mobile phosphorus, potassium and sulfur, an increase in the amount of absorbed bases, a decrease in metabolic acidity in arable land compared with adjacent forest areas. However the sanitary condition of both arable land and adjacent territories deteriorated significantly. A significant increase in the total microbial number (TMN) was revealed in all soil samples in comparison to the normative indicators. Particularly high values of TMN were found in soil fertilized with cattle manure. The corresponding soil was characterized by the highest content of organic matter and neutral reactions of the environment, which provided favorable conditions for the active development of saprophytic microbiota. Fresh faecal contamination was detected in all selected soil samples. Soils are characterized as highly polluted. According to the indicators of the index *Escherichia coli*, *Enterococcus* and *Clostridium perfringens*, the soils of all studied sites are moderately dangerous. Higher values of the corresponding indices were found in arable land fertilized by the LF of pork farms and in the territories adjacent to arable land. In the course of sanitary and bacteriological studies, eggs of helminthes were not found in the soil.

Keywords: by-products of animal husbandry, organic fertilizers, soil sanitation, biological pollution.

Согласно ГОСТ 30772-2001, биологическое загрязнение представляет собой «случайное или происходящее как следствие деятельности человека проникновение в экосистемы или технические устройства видов животных (бактерий) и/или растений, обычно там отсутствующих». При этом происходит изменение естественного состава организмов, характерного для тех или иных территорий, нарушение сложившихся связей и отношений между отдельными организмами и группами организмов, снижение качества и безопасности природной среды для населения. Особую опасность представляет загрязнение окружающей среды (ОС) патогенными микроорганизмами (МО). Одним из источников такого загрязнения являются продукты жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (навоз, навозные стоки), широко используемые в качестве органических удобрений [1, 2]. Содержание различных бактерий в 1 г свежих фекалий достигает 10^9 – 10^{10} колониеобразующих единиц (КОЕ) [3]. Кроме бактерий в навозе содержатся гельминты и яйца гельминтов, а также грибы, вирусы, простейшие, некоторые из них представляют серьёзную опасность для здоровья человека и животных [4, 5]. Среди характерных для навоза МО выявлены возбудители сальмонеллёза, патогенные серотипы кишечной палочки, туберкулёза, бруцеллёза, африканской чумы свиней и различные энтеровирусы [6]. Степень выживания патогенных

МО в навозе или ОС зависит от характеристик конкретного организма, источника и состава навоза (рН, влажность, содержание аммония и др.), способов его обработки, условий ОС (температуры, доступа кислорода, наличия или отсутствия тех или иных питательных веществ, микробной конкуренции и др.) [7–9]. Для минимизации рисков биологического загрязнения ОС навоз и навозные стоки (побочные продукты животноводства, ППЖ) перед внесением в пашню обеззараживают. Чаще всего технология обеззараживания включает разделение ППЖ на жидкую (ЖФ) и твёрдую (ТФ) фракции с последующим длительным выдерживанием ТФ на специально оборудованных площадках, а ЖФ – в лагунах. Основными факторами снижения патогенной нагрузки ППЖ в этот период являются активные микробиологические процессы, приводящие к деструкции органических веществ и снижению численности менее конкурентных МО, а также воздействие неблагоприятных факторов ОС, вызывающее гибель патогенной микробиоты. Соответствующая технология позволяет существенно снизить риски переноса патогенных и условно-патогенных МО в удобряемую почву, но не исключает их полностью [10, 11]. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что территории размещения животноводческих предприятий являются зонами повышенного экологического риска [12–14]. Одним из действенных

факторов предупреждения чрезмерной нагрузки промышленного животноводства на ОС и население является постоянный экологический мониторинг состояния территорий, расположенных в зоне влияния предприятий соответствующей отрасли [15]. Получение достоверной информации о содержании в почве МО, представляющих опасность для человека или животных, имеет большое практическое значение для предотвращения или прогнозирования и профилактики возможных негативных последствий [16].

Цель работы – изучить влияние долговременного внесения обезвреженных навозных стоков на санитарно-гигиеническое состояние и микробиологические характеристики пахотной почвы и почвы прилегающих территорий.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в Кировской области. В качестве объектов изучения были выбраны два пахотных поля, расположенные вблизи крупного свиноводческого комплекса (Поле 1) и молочной фермы (Поле 2). Почвы полей агродерново-подзолистые среднесуглинистые. Оба поля используются в кормовом севообороте. Поле 1 удобряли откачиваемой из лагун обезвреженной ЖФ свиных навозных стоков (НС), Поле 2 – обезвреженной ЖФ навоза крупного рогатого скота (КРС). Жидкую фракцию вносили в пашню с помощью буксируемой шланговой системы на глубину до 50 см. Среднегодовая норма внесения ЖФ в период с 2016 по 2023 гг. составила 200 ± 20 т/га. Нормы внесения рассчитывались агрохимической службой животноводческих предприятий с учётом экологических требований по дозе вносимого азота. Пробы почвы с прилегающих территорий (Лес 1 и Лес 2) отбирали на расстоянии 550 ± 50 м от границ соответствующих пахотных полей на заросших лесом участках. Почвы лесных участков дерново-подзолистые среднесуглинистые.

Отбор проб для микробиологических, паразитологических и химических исследований проводили в начале октября 2023 г. согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. Точечные пробы с пробных площадок отбирали методом конверта на глубину 20–25 см. Размер пробной площадки – 10×10 м. Из точечных проб составляли объединённые пробы. Всего было отобрано 60 точечных проб и приготовлено 12 объединённых проб (по 3 объединённые пробы с каждого поля и лесного участка). При отборе

и обработке проб использовали приёмы, исключающие возможность вторичного загрязнения почвы. Пробы почвы, предназначенные для микробиологических исследований, отбирали стерильными инструментами в стерильную тару с соблюдением условий асептики. Все исследования проводили в специализированных лабораториях. Методы химического анализа почвы представлены в таблице 1.

Оценку санитарно-гигиенического состояния обследованных участков выполняли согласно методическим рекомендациям по методам микробиологического контроля почвы [17]. Санитарно-гигиеническое состояние почвы оценивали по таким показателям как общее микробное число (ОМЧ), титр и индекс санитарно-показательных для фекального загрязнения МО [18]. К последним относят бактерии группы кишечной палочки (БГКП), рода энтерококков и вида *Clostridium perfringens*, а также количество бактерий рода *Salmonella*. Титр – наименьшее количество почвы в 1 г, в котором обнаружен 1 искомый МО. Индекс – количество МО в КОЕ, обнаруженных в 1 г почвы. Кроме микробиологических исследований, проводили паразитологический анализ почвы на наличие яиц гельминтов.

Для выявления состава и количества санитарно-показательных МО осуществляли ряд последовательных десятикратных разведений почвенной суспензии с последующим её высевом на стандартные и специализированные питательные среды в соответствии с ОФС.1.7.2.0008.15 (модифицированный агаровый чашечный метод) и идентификацией МО. Общее микробное число определяли глубинным посевом на МПА. Для фиксации колиформных бактерий использовали прямой посев на специализированную среду Эндо. Энтерококки определяли методом титриметрии, для подсчёта термофильных бактерий использовали глубинный посев на МПА, сальмонеллы фиксировали методом накопления патогенных бактерий в средах обогащения с последующим пересевом на плотные селективные и дифференциальные среды. Для культивирования *Clostridium perfringens* использовали газогенерирующие пакеты «АНА-ЭРОГАЗ» (НПО «ИНКО», Россия). Также проводили изучение биохимических свойств выделенных культур с использованием биохимических тестов ERBALachema: АНАЭРО-тест23, ЭНТЕРОтест24 N, САНДИДАтест21.

Паразитологическое исследование проб почвы проводили по методу Романенко.

Таблица 1 / Table 1

Свойства и химический состав почвы / Properties and chemical composition of soils

Показатели Index	Значения / Indicators				Метод анализа Method of analysis
	Поле 1 Field 1	Лес 1 Forest 1	Поле 2 Field 2	Лес 2 Forest 2	
pH _{KCl}	4,9±0,2 (средне-кислые medium acidic)	4,2±0,1 (сильно-кислые strongly acidic)	6,8±0,1 (нейтральные neutral)	4,5±0,2 (сильно-кислые strongly acidic)	Ионометрический по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85) Ionometric method by TsINAO in accordance with GOST 26483-85
Органическое вещество, % Organic matter, %	4,4±0,6 (повышенное / elevated)	2,2±0,4 (повышенное / elevated)	5,3±0,7 (повышенное / elevated)	2,4±0,4 (повышенное / elevated)	Метод Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91) Tyurin's method in the modification of TsINAO (GOST 26213-91)
Фосфор подвижный (P ₂ O ₅), мг/кг Mobile phosphorus (P ₂ O ₅), mg/kg	754±140 (очень высокое / very high)	178±34 (высокое / high)	987±110 (очень высокое / very high)	165±36 (высокое / high)	Фотометрический по ГОСТ Р 54650-2011 Photometric (GOST R 54650-2011)
Калий подвижный (K ₂ O), мг/кг Mobile potassium (K ₂ O), mg/kg	345±46 (высокое / high)	135±34 (повышенное / elevated)	460±55 (высокое / high)	146±44 (повышенное / elevated)	
Сумма поглощённых оснований, мг-экв./100 г Amount of absorbed bases, mEq/100 g	16,0±2,3 (повышенное / elevated)	5,6±0,7 (низкое / low)	18,6±1,9 (повышенное / elevated)	6,4±1,1 (низкое / low)	По методу Каппена (ГОСТ 27821-2020) According to the Kappen method (GOST 27821 -2020)
Сера подвижная, мг/кг / Mobile sulfur, mg/kg	8,4±1,8 (среднее / average)	5,2±1,4 (низкое / low)	8,5±2,3 (среднее / average)	5,4±1,5 (низкое / low)	По методу ЦИНАО (ГОСТ 26490-85) According to the TsINAO method (GOST 26490-85)

Примечание: в скобках указаны группы почв по каждому показателю. Полуужирным шрифтом выделены статистически значимые различия между показателями, установленными для почвы пахотных полей и почвы соответствующих лесных участков (p<0,05).

Note: soil groups for each indicator are indicated in brackets. Statistically significant differences between the indicators established for the soil of arable fields and the soil of the corresponding forest areas (p<0.05) are highlighted in bold.

Для статистической обработки полученных результатов использовали встроенный пакет программ Microsoft Excel. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по t-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Выполненные исследования показали, что длительное внесение обезвреженной ЖФ привело к существенному изменению химического состава агрозоёмов (Поле 1, Поле 2) по срав-

нению с составом почв лесных участков (Лес 1, Лес 2). В удобряемой ЖФ пашне значительно увеличилось содержание органического вещества, подвижного фосфора, калия и серы, повысилась сумма поглощённых оснований, снизилась обменная кислотность. Данные о химическом составе и свойствах отобранных образцов почвы приведены в таблице 1.

Хорошо известно, что здоровые (супрессивные) природные почвы обладают высоким потенциалом к самоочищению в отношении многих патогенных МО. Такие почвы не

представляют опасности в эпидемическом и гигиеническом плане. Нарушение нормального функционирования естественных почвенных микробиоценозов под влиянием хозяйственной деятельности приводит к подавлению супрессивности, в результате чего способность почв к самоочищению снижается, почвы становятся кондуктивными (не способными подавлять патогены). Кондуктивная почва представляет серьёзную опасность для стабильного существования экосферы.

В таблице 2 приведены результаты бактериологических исследований, характеризующие санитарно-гигиеническое состояние удобряемой ЖФ пашни и заросших лесом участков.

Согласно данным, приведённым в таблице 2, систематическое долговременное внесение обесвреженной ЖФ привело к ухудшению санитарного состояния пахотных полей и при-

легающих территорий. Во всех пробах почвы было выявлено существенное увеличение ОМЧ. Особенно высокие значения соответствующего показателя были установлены в почве, удобряемой ЖФ навоза КРС (Поле 2). Соответствующая почва характеризовалась самым высоким содержанием органического вещества и нейтральной реакцией среды (табл. 1), что обеспечивало благоприятные условия для активного развития сапрофитной микробиоты.

Значения титра БГКП и *Clostridium perfringens* превышали установленные санитарные нормативы для чистых почв (0,01 и выше) на 3 порядка. Бактерии группы кишечной палочки и сульфатредуцирующие клостридии (*Clostridium perfringens*) являются показателями фекального загрязнения почв. Благодаря спорообразованию, клостридии, в отличие от кишечной палочки, способны длительное время сохранять свою жизнеспособность

Таблица 2 / Table 2
Санитарно-гигиеническое состояние обследованных участков почвы
Sanitary and hygienic condition of the studied soil areas

Показатели Index		Значения / Indicator value				Нормативные показатели / Standard indicators [17, 19, 20]
		Поле 1 Field 1	Лес 1 Forest 1	Поле 2 Field 2	Лес 2 Forest 2	
Общее микробное число, КОЕ/г / Total microbial number, CFU/g		(6,0±0,9) ·10 ⁷	(8,0±1,2) ·10 ⁷	(7,0±1,5) ·10 ⁸	(7,0±1,3) ·10 ⁶	10 ⁴
Индекс, КОЕ/г Index, CFU/g	БГКП* <i>Escherichia coli</i>	40	40	20	20	10–100 – умеренно опасная moderately dangerous
	энтерококки <i>enterococcus</i>	40	20	10	20	
	<i>Clostridium perfringens</i>	40	40	40	40	
Патогенные, в том числе сальмонеллы, КОЕ/г Pathogenic, including <i>Salmonella</i> , CFU/g		0	0	(6,0±1,1) ·10 ⁷	(8,0±0,7) ·10 ⁶	не допускаются not allowed
Яйца гельминтов, экз./кг Helminth eggs, ind./kg		0	0	0	0	0 – чистая / clean
Титры Titer	БГКП <i>Escherichia coli</i>	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	0,009 и менее – сильно загрязнённая 0,009 and less – heavily polluted
	Термофиль- ные бактерии thermophilic bacteria	10 ⁵	10 ⁸	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁵ и более – сильно загрязнённая 10 ⁵ and more – heavily polluted
	<i>Clostridium perfringens</i>	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴ и менее – сильно загрязнённая 10 ⁻⁴ and less – heavily polluted

Примечание: *БГКП – бактерии группы кишечной палочки.
Note: **Escherichia coli* – coliform bacteria.

в почве. Наличие в почве и клостридий, и БГКП свидетельствует о свежем, а отсутствие БГКП и наличие клостридий – о давнем фекальном загрязнении. Согласно результатам выполненных исследований, во всех отобранных образцах почвы отмечено свежее фекальное загрязнение, а почвы характеризуются как сильно загрязнённые.

Титр термофильных бактерий в почвах всех участков был также выше установленных нормативов. Термофильные бактерии за счёт активного участия в разложении органических субстратов играют ключевую роль в процессах компостирования навоза. Даже однократное внесение навоза в почву приводит к заметному увеличению численности этих МО, что позволяет использовать термофильные бактерии в качестве показателя фекального загрязнения почвы. Споры термофильных МО могут сохранять свою жизнеспособность в почвах на протяжении многих лет [21].

В соответствии с такими показателями, как индексы БГКП, энтерококков и *Clostridium perfringens*, почвы всех обследованных участков относятся к умеренно опасным. Более высокие значения соответствующих индексов выявлены в пашне, удобряемой ЖФ свиных навозных стоков, и на прилегающих к пашням территориях.

Следует отметить, что выживаемость энтерококков в почве существенно зависит от температуры. При 20 °С эти МО погибают в течение 10 дней. Более низкие температуры способствуют сохранению их жизнеспособности до нескольких месяцев. Пробы почвы для микробиологических исследований отбирали в октябре, т. е. в период благоприятный для выживания энтерококков.

Особую тревогу вызывает выявление в образцах почвы «Поле 2» и «Лес 2» значительных количеств патогенных МО, присутствие которых в почвах по санитарным нормам не допускается. Все выявленные патогенные МО относились к IV и III группам патогенности. В IV группу входят условно-патогенные МО, не представляющие или представляющие низкую индивидуальную и общественную опасность; в III группу – МО, представляющие умеренную индивидуальную и низкую общественную опасность [22]. В таблице 3 приведены данные о составе микробиоты отобранных образцов почвы.

Согласно полученным данным, для всех проб почвы было характерно высокое содержание бактерий родов *Proteus* и *Clostridium*. Соответствующие бактерии широко распро-

странены в природных средах (почве, воде, пылевых частицах воздуха), входят в состав нормальной микробиоты кишечника человека и животных, относятся к гнилостным условно-патогенным МО и рассматриваются как индикаторы фекального загрязнения различных объектов. Согласно СанПиН 3.3686-21 такие виды клостридий как *C. bifermentans*, *C. septicum* и *C. perfringens* классифицируются как ПБА IV группы. Во всех пробах почвы из соответствующего списка присутствовали только *C. perfringens*. *Clostridium bifermentans* были выявлены в агрозёмах и отсутствовали в почве контрольных участков. Самой высокой численностью и видовым разнообразием клостридий характеризовались пробы почвы, удобряемой ЖФ свиных НС. Численность *C. sporogenes* в пахотном горизонте пробы «Поле 1» достигала $(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$ КОЕ/г. В пробе почвы «Лес 1» общая численность клостридий была значительно ниже, чем в пашне. К ПБА IV группы относятся также *Enterococcus faecalis*, *Enterococcus faecium* и *Bacillus cereus*, выявленные во всех исследованных пробах.

Для всех образцов почвы было характерно высокое количество плесневых и дрожжевых грибов. Такие представители выявленной грибной микробиоты, как *Penicillium* spp. и *Mucor* spp. относятся к ПБА IV группы, а *Candida albicans* – к III. Самая высокая численность *Candida albicans* была характерна для проб почвы, отобранных на поле, удобряемом ЖФ навоза КРС. Согласно опубликованным данным, *C. albicans* вызывает около 70% микозов, в том числе опасный кандидозный эндометрит КРС [23].

Выполненные в рамках настоящей работы санитарно-паразитологические исследования были направлены на выявление в почве яиц гельминтов на разных стадиях развития. Почва является необходимым субстратом для созревания яиц геогельминтов, а также местом временного пребывания яиц биогельминтов и цист кишечных патогенных простейших. Жизнеспособность яиц геогельминтов в почве сохраняется несколько лет, яиц биогельминтов – до 1 года, цист патогенных простейших – от нескольких дней до 6 месяцев. Паразитарные заболевания представляют серьёзную угрозу для здоровья человека, продуктивности животных и качества получаемой продукции. Ветеринарные службы животноводческих предприятий уделяют вопросам профилактики паразитарных заболеваний большое внимание, что

Таблица 3 / Table 3

Состав микробиоты отобранных образцов почвы / Composition of the microbiota of selected soil samples

Микроорганизмы Microorganisms		Содержание, КОЕ/г / Content, CFU/g			
		Поле 1 Field 1	Лес 1 Forest 1	Поле 2 Field 2	Лес 2 Forest 2
Факультативные анаэробы / Facultative anaerobes					
<i>Proteus</i> spp.		$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$
<i>Enterococcus</i>	<i>faecalis</i>	$(4,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^1$
	<i>faecium</i>	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^1$
<i>Bacillus</i>	<i>cereus</i>	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$
	<i>subtilis</i>	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$
	<i>megaterium</i>	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$	0	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$
<i>Actinomyces</i>	spp.	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$	0	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^1$
	<i>israelii</i>	0	0	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$
	<i>naeslundii</i>	0	0	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	0
<i>Lactobacillus</i> spp.		$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^2$	0	0	0
<i>Pseudoramibacter</i> spp.		$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	0	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$
<i>Escherichia coli</i>		$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^3$
Облигатные анаэробы / Obligate anaerobes					
<i>Clostridium</i>	<i>sporogenes</i>	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^7$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$
	<i>putrificum</i>	$(7,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$
	<i>bif fermentans</i>	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	0	$(8 \pm 0,3) \cdot 10^5$	0
	<i>septicum</i>	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$	0	0	$(5,0 \pm 0,5) \cdot 10^2$
	<i>perfringens</i>	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$
<i>Bifidobacterium</i> spp.		$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^1$	0	0	0
<i>Eubacterium</i> spp.		$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^2$
Аэробы / Aerobes					
<i>Pseudomonas</i> spp.		$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	0	0
Плесневые грибы / Molds					
<i>Penicillium</i> spp.		$(7,0 \pm 0,2) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$
<i>Aspergillus</i> spp.		$(9,0 \pm 0,8) \cdot 10^6$	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$
<i>Mucor</i> spp.		$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^6$	$(9,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
<i>Rhizopus</i> spp.		$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(9,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$
<i>Cladosporium</i> spp.		$(7,0 \pm 0,1) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^6$
<i>Trichoderma</i> spp.		$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^2$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$	$(5,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$
<i>Geotrichum</i>	<i>candidum</i>	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(9,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,1) \cdot 10^6$
	<i>capitatum</i>	$(6,0 \pm 0,5) \cdot 10^6$	$(4,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,1) \cdot 10^3$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^7$
Дрожжеподобные грибы / Yeast-like mushrooms					
<i>Candida</i>	<i>parapsilosis</i>	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^2$	$(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^3$	$(7,0 \pm 0,6) \cdot 10^3$
	<i>rugosa</i>	$(7,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^4$	$(7,0 \pm 0,1) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^3$
	<i>albicans</i>	$(4,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$	$(5,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,3) \cdot 10^4$
	<i>catenulate</i>	$(9,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,5) \cdot 10^5$	$(4,0 \pm 0,1) \cdot 10^2$	$(4,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
Дрожжи / Yeast					
<i>Rhodotorula glutinis</i>		$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 0,2) \cdot 10^5$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		$(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 0,2) \cdot 10^4$	$(4 \pm 0,7) \cdot 10^4$	$(8,0 \pm 0,1) \cdot 10^5$

способствует не только сохранению здоровья животных, но и защите ОС от загрязнения. Ни в одном из отобранных образцов почвы яйца гельминтов не были выявлены. Таким образом, по санитарно-паразитологическим показателям обследованные почвы можно отнести к чистым.

Заключение

Анализ результатов выполненных исследований свидетельствует о значительном свежем фекальном загрязнении как удобряемой обезвреженными навозными стоками пашни, так и прилегающих территорий. Обезврежи-

вание ЖФ в лагунах и внесение жидких органических удобрений буксируемой шланговой системой на значительную глубину не позволяет предотвратить перенос характерных для навоза сельскохозяйственных животных МО в окружающую среду. Показатели санитарно-гигиенического состояния обследованных участков почвы, расположенных на расстоянии 500 м от границ пашни, практически не отличались от соответствующих показателей удобряемых полей. Установленный факт свидетельствует о высокой степени риска биологического загрязнения территорий побочными продуктами животноводства. Для минимизации соответствующих рисков необходимо совершенствовать технологию обезвреживания и внесения ППЖ в почву, а также усилить санитарно-гигиенический контроль за состоянием почв, находящихся в зоне влияния животноводческих предприятий. Контроль биологического загрязнения почвы сельскохозяйственных и сопряжённых территорий является важной составляющей экологического мониторинга, поскольку почва относится к наиболее стабильным индикаторам загрязнения окружающей среды, а от её биобезопасности зависит эпидемическое и гигиеническое благополучие населения.

Литература

1. Сазанов А.В., Терентьев Ю.Н., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Козвонин В.А. Производство биоорганических удобрений как направление реализации безотходных технологий в свиноводстве // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 85–90. doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090
2. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козвонин В.А., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я. Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 199–205. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-199-205
3. Heinonen-Tanski H., Mohaibes M., Karinen P., Koivunen J. Methods to reduce pathogen microorganisms in manure // Livestock science. 2006. V. 102. No. 3. P. 248–255. doi: 10.1016/j.livsci.2006.03.024
4. Бетин А.Н., Фролов А.И., Филиппова О.Б., Хализова З.Н. Утилизация навозных стоков животноводческих предприятий с целью улучшения экологии окружающей среды // Эффективное животноводство. 2021. № 6 (172). С. 96–98. doi: 10.24412/el-33489-2021-6-96-98
5. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Колеватых Е.П. Оценка безопасности восстановленной подстилки, полученной на фильтрационно-сушильной установке // Российский журнал прикладной экологии. 2023. № 1 (33). С. 45–51. doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.45.51

6. Беззубов В.И., Петрушко А.С., Рудаковская И.И., Коломиец Э.И., Сверчкова Н.В., Красочко П.А. Биологическое обеззараживание навозных стоков свиноводческих комплексов // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2013. № 16 (2). С. 283–289.
7. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я., Кузнецов Д.А. Влияние гипохлорита натрия на микробиоту и запах навозных стоков // Поволжский экологический журнал. 2023. № 1. С. 107–116. doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116.e
8. Manyi-Loh C.E., Mamphweli S.N., Meyer E.L., Makaka G., Simon M., Okoh A.I. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13. No. 9. Article No. 843. doi: 10.3390/ijerph13090843
9. Tang M., Wu Z., Li W., Shoaib M., Aqib A.I., Shang R., Yang Z., Pu W. Effects of different composting methods on antibiotic-resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and microbial diversity in dairy cattle manures // J. Dairy Sci. 2023. V. 106. No. 1. P. 257–273. doi: 10.3168/jds.2022-22193
10. Колеватых Е.П., Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козвонин В.А., Ашихмина Т.Я. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159–165. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165
11. Bicudo J.R., Goyal S.M. Pathogens and manure management systems: a review // Environ. Technol. 2003. V. 24. No. 1. P. 115–130. doi: 10.1080/09593330309385542
12. Paunova-Hubenova E.N., Trichkova-Kashamova E.D. Sustainable practices in contemporary livestock farming // Bulg. Chem. Commun. 2023. V. 55. No. 2. P. 108–116. doi: 10.34049/bcc.55.2.5560.
13. Тарасов С.И., Кравченко М.Е., Бужина Т.А. Мониторинг почв в хозяйствах индустриального животноводства // Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса: монография. Суздаль-Иваново: ООО «ПресСто»; ФГБ НУ «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр», 2022. С. 50–54.
14. Пилип Л.В. Анализ экологических рисков отрасли свиноводства в Кировской области // Вестник Вятской ГСХА. 2020. № 1 (3) [Электронный ресурс] <https://v-vgsha.info/2020/06/02/analiz-jekologicheskikh-riskov-otrasli-svinovodstva-v-kirovskoj-oblasti/> (Дата обращения: 21.11.2023).
15. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Охтилев М.Ю., Коромысличенко В.Н. Инструмент для мониторинга экологического состояния и устойчивого развития сельскохозяйственного производства // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1 (49). С. 78–84. doi: 10.22314/27132064-2023-1-78
16. Соколов М.С., Соколов Д.М. Санитарно-бактериологическая оценка почвы и органических удобрений // Агрохимия. 2014. № 5. С. 3–19.

17. МУК 4.2.3695-24. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. Методические рекомендации [Электронный ресурс] <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=118445> (Дата обращения: 07.03.2024).

18. Соколов М.С., Соколов Д.М., Тымчук С.Н., Ларин В.Е. Методология и показатели санитарно-микробиологического контроля безопасности почвы (аналитический обзор) // Биосфера. 2014. Т. 6. № 2. С. 158–169.

19. Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы (утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР 19.02.1981 № 2293-81) [Электронный ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/1200119846> (Дата обращения: 07.03.2024).

20. МУ 2.1.7.730.99. Гигиеническая оценка качества почвы населённых мест. Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

21. Чернышева Е.В., Каширская Н.Н., Демкина Е.В., Коробов Д.С., Борисов Д.С. Термофильные микроорганизмы в почвах как результат хозяйственной деятельности человека в древности // Микробиология. 2019. Т. 88. № 5. С. 624–626. doi: 10.1134/S0026365619050045

22. Суранова Т.Г., Чикова С.С., Широков А.Ю., Никифоров В.В. Комплекс мероприятий, проводимых медицинской организацией по предупреждению заноса и распространения инфекционных болезней, вызывающих чрезвычайную ситуацию в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2015. № 2. С. 4–11.

23. Потехина Р.М., Трemasова А.М., Калимуллин Ф.Х., Милованкин Д.И., Бирюля В.В., Трemasов Ю.М., Сагдеева З.Х. Поражения желудочно-кишечного тракта у крупного рогатого скота грибами *Candida albicans* // Вестник КрасГАУ. 2022. № 12. С. 77–83. doi: 10.36718/1819-4036-2022-12-77-83

References

1. Sazanov A.V., Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kozvonin V.A. Production of bioorganic-mineral fertilizers as the direction of realization of wastefree technologies in pig-breeding // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 3. P. 85–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090

2. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V. Biological contamination of arable land with pig waste // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 199–205 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-199-205

3. Heinonen-Tanski H., Mohaibes M., Karinen P., Koivunen J. Methods to reduce pathogen microorgan-

isms in manure // Livestock Science. 2006. V. 102. No. 3. P. 248–255. doi: 10.1016/j.livsci.2006.03.024

4. Betin A.N., Frolov A.I., Filippova O.B., Khalizova Z.N. Utilization of manure effluents of livestock enterprises in order to improve the ecology of the environment // Efficient Animal Husbandry. 2021. No. 6 (172). P. 96–98 (in Russian). doi: 10.24412/cl-33489-2021-6-96-98

5. 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. 1 (33). P. 45–51 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.45.51

6. Bezzubov V.I., Petrushko A.S., Rudakovskaya I.I., Kolomiets E.I., Sverchkova N.V., Krasochko P.A. Biological decontamination of manure drains at pig farms // Actual problems of intensive development of animal husbandry. 2013. No. 16 (2). P. 283–289 (in Russian).

7. 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 J. of Ecology. 2023. No. 1. P. 107–116 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116

8. Manyi-Loh C.E., Mamphweli S.N., Meyer E.L., Makaka G., Simon M., Okoh A.I. An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13. No. 9. Article No. 843. doi: 10.3390/ijerph13090843

9. Tang M., Wu Z., Li W., Shoaib M., Aqib A.I., Shang R., Yang Z., Pu W. Effects of different composting methods on antibiotic-resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and microbial diversity in dairy cattle manures // J. Dairy Sci. 2023. V. 106. No. 1. P. 257–273. doi: 10.3168/jds.2022-22193

10. 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

11. Bicudo J.R., Goyal S.M. Pathogens and manure management systems: a review // Environ. Technol. 2003. V. 24. No. 1. P. 115–130. doi: 10.1080/09593330309385542

12. Paunova-Hubenova E.N., Trichkova-Kashamova E.D. Sustainable practices in contemporary livestock farming // Bulg. Chem. Commun. 2023. V. 55. No. 2. P. 108–116. doi: 10.34049/bcc.55.2.5560

13. Tarasov S.I., Kravchenko M.E., Buzhina T.A. Soil monitoring in industrial livestock farms // Modern trends in scientific support of the agro-industrial complex. Suzdal-Ivanovo: LLC “PresSto”; FSB NU “Verkhnevolzhsky Federal Agrarian Scientific Center”, 2022. P. 50–54 (in Russian).

14. Pilip L.V. Analysis of ecological risks of the pig breeding industry in the Kirov region // Vestnik Vyatskoj GSHA. 2020. No. 1 (3) [Internet resource] <https://v-vgsha.info/2020/06/02/analiz-jekologicheskikh-riskov-otrasli>

svinovodstva-v-kirovskoj-oblasti/ (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

15. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Okhtilev M.Yu., Koromyslichenko V.N. An instrument for environmental state and agricultural production's sustainable development monitoring // Machinery and technologies in livestock. 2023. No. 1 (49). P. 78–84 (in Russian). doi: 10.22314/27132064-2023-1-78

16. Sokolov M.S., Sokolov D.M. Sanitary-bacteriological evaluation of soils and organic fertilizers // Agrokhimiya. 2014. No. 5. P. 3–19 (in Russian).

17. МУСК 4.2.3695-21. Control methods. Biological and microbiological factors. Methods of microbiological control of soil. Methodological recommendations [Internet resource] <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=118445> (Accessed: 07.03.2024) (in Russian).

18. Sokolov M.S., Sokolov D.M., Tymchuk S.N., Larin V.E. Methodology and parameters used in sanitary microbiological control of soil safety (analytical review) // Biosphere. 2014. V. 6. No. 2. P. 158–169 (in Russian).

19. Methodological guidelines for sanitary and microbiological examination of soil (approved by the Deputy Chief State Sanitary Doctor of the USSR 19.02.1981

No. 2293-81) [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/1200119846> (Accessed: 07.03.2024) (in Russian).

20. МУ 2.1.7.730.99. Hygienic evaluation of soil in residential areas. Methodological guidelines. Moskva: Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of the Russian Federation, 1999. 38 p. (in Russian).

21. Chernyshova E.V., Kashirskaya N.N., Demkina E.V., Korobov D.S., Borisov A.V. Thermophilic microorganisms in soils as a result of ancient human activity // Microbiology. 2019. V. 88. No. 5. P. 646–648 (in Russian). doi: 10.1134/S0026365619050045

22. Suranova T.G., Chikova S.S., Shirokov A.Yu., Nikiforov V.V. A set of activities being implemented by the medical organization to prevent the carrying and spread of infectious diseases, which give rise an emergency situation in the field of sanitary and epidemiological welfare of the population // Epidemiologiya i Infektsionnye Bolezni. 2015. No. 2. P. 4–11 (in Russian).

23. Potekhina R.M., Tremasova A.M., Kalimullin F.Kh., Milovankin D.I., Biryulya V.V., Tremasov Yu.M., Sagdeeva Z.Kh. Gastrointestinal tract lesions in cattle by *Candida albicans* fungi // Bulliten of KrasSAU. 2022. No. 12. P. 77–83 (in Russian). doi: 10.36718/1819-4036-2022-12-77-83

Фауна и население птиц гористых районов южного берега Варангер-фьорда

© 2024. И. В. Зацаринный¹, к. б. н., руководитель лаборатории,
У. Ю. Шаврина^{2,3}, н. с., Е. В. Валова³, н. с.,
О. В. Натальская⁴, начальник отдела,

¹Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
390000, Россия, г. Рязань, ул. Свободы, д. 46,

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

³Государственный природный заповедник «Пасвик»,
184404, Россия, Мурманская область, Печенгский район, пос. Раякоски,

⁴ФБУ Рослесозащита – Центр защиты леса Рязанской области,
390044, Россия, г. Рязань, ул. Московское шоссе, д. 12,

e-mail: zatsarinny@mail.ru

В статье приводятся данные полевых исследований изучения фауны и населения птиц гористых районов южного берега Варангер-фьорда, перспективных с точки зрения включения в границы проектируемого заказника федерального значения «Ворьема». Полевые исследования выполнялись в гнездовой период 2019–2021 гг. в северо-западной части Печенгского района Мурманской области. В ходе выполнения работ были обследованы гористые районы от участков, примыкающих к долине реки Ворьема, до районов в окрестностях посёлка Лиинахамари. Совокупная протяжённость учётных маршрутов составила 81,8 км. Анализ полученных полевых материалов о фауне территории показывает, что в гнездовой период здесь встречается не менее 53 видов птиц. Тундровые и скалистые районы являются местами размножения поморников, чаек, гагар, ряда видов куликов и уток. Обследованные территории служат местами гнездования ряда редких видов птиц: лебедя-кликлуна, лутка, беркута, орлана-белохвоста, пустельги, белозобого дрозда. Результаты исследования показывают, что обследованные территории гористых районов южного берега Варангер-фьорда перспективны с точки зрения включения в границы проектируемого заказника федерального значения «Ворьема», обладают характерной структурой населения птиц и служат местами размножения редких видов.

Ключевые слова: орнитофауна, Мурманская область, проектируемый заказник «Ворьема».

Fauna and bird population of the mountainous areas of the Varangerfjord southern coast

© 2024. I. V. Zatsarinny¹ ORCID: 0000-0002-9784-4239, U. Y. Shavrina^{2,3} ORCID: 0000-0002-1887-0085,
E. V. Valova³ ORCID: 0009-0000-0970-6550, O. V. Natalskaya⁴ ORCID: 0009-0004-6336-2567

¹Ryazan State University named after S.A. Yesenin,
46, Svobody St., Ryazan, Russia, 390000,

²National Research Tomsk State University,
36, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050,

³Pasvik State Nature Reserve,
village Rayakoski, Pechengsky district, Murmansk region, Russia, 184404,

⁴FBU Roslesozashchita – Forest Protection Center of the Ryazan region,
12, Moskovskoe shosse St., Ryazan, Russia, 390044,

e-mail: zatsarinny@mail.ru

The article presents data from field studies of the fauna and bird population of mountainous areas of the Varangerfjord southern coast. This area has perspectives to be included in the boundaries of the projected “Voryema” Federal Reserve. We carried field studies during the 2019–2021 breeding period in the northwestern part of the Pechengsky district of the Murmansk region. In the course of the work, we surveyed mountainous areas from areas adjacent to the

Voryema River valley to areas near the Liinahamari settlement. The total length of survey routes was 81.8 km. Analysis of the received field materials shows that at least 53 bird species occur in the breeding season. Tundra and rocky areas are breeding sites for skuas, gulls, loons, and a number of sandpipers' and ducks' species. The combination of different habitats creates the possibility of the presence of four species of pipits on this territory at once. Therefore, this territory can be a good model for studying the effects of climate change on a number of closely related species living together. In general, the results of the study show that the surveyed territories of the mountainous areas of the Varangerfjord southern coast are promising for inclusion in the boundaries of the projected Voryema Federal Reserve. They have a characteristic bird population structure and serve as breeding grounds for a number of rare species (whooper swan, whooper, golden eagle, white-tailed eagle, kestrel, white-throated thrush).

Keywords: ornithofauna, Murmansk region, the projected Voryema Reserve.

Горные районы северо-запада России являются важными территориями в поддержании биологического разнообразия. В Мурманской области многие из этих районов находятся под охраной и включены в систему особо охраняемых природных территорий. Крупные горные массивы этого региона находятся на территории Лапландского государственного природного биосферного заповедника, Национального парка «Хибины», заказника «Лапландский лес» и целого ряда других территорий. Гористые районы (тунтури), расположенные вдоль побережья Баренцева моря на отдельных участках, также находятся под охраной и включены в региональную систему природных парков (полуострова Рыбачий и Средний, Териберка). Некоторые перспективные территории входят в перечень проектируемых. С орнитологической точки зрения горные районы Мурманской области остаются сравнительно слабо изученными. Наиболее полные данные представлены по Хибинскому и Ловозерскому горным массивам, горно-тундровым районам Лапландского заповедника, горным территориям заповедника «Пасвик», природного парка «Кораблекк» и ряда других территорий [1–8]. Результатов исследований по птицам гористых районов, примыкающих к побережью Баренцева моря, сравнительно меньше [8–10].

Целью исследования было изучение фауны и населения птиц гористых районов южного берега Варангер-фьорда, перспективных с точки зрения включения в границы проектируемого заказника федерального значения «Ворьема».

Объекты и методы исследований

Полевые исследования выполнялись в гнездовой период 2019–2021 гг. в северо-западной части Печенгского района Мурманской области. В ходе выполнения работ были обследованы гористые районы южного берега Варангер-фьорда от участков, примыкающих

к долине р. Ворьемы, до районов в окрестностях посёлка Лиинахамари. В гнездовой период 2019 г. были обследованы районы Калиотунтури, залива Долгая щель, участки севернее и северо-западнее озера Трифонаярви, территории, примыкающие к озёрам Кукшинъярви и Кянтеярви, участки южнее бухты Малонемецкая западная. В 2020–2021 гг. были обследованы районы от долины р. Ворьемы на восток к участкам южнее бухт Финманская, Полютиха Западная и окрестностям озера Валькеаярви. Совокупная протяжённость маршрутных учётов составила 81,8 км, из которых в берёзовых лесах в долинах ручьёв и межгорных понижениях было пройдено 20,4 км, а на тундровых и скалистых территориях – 61,4 км. Птиц учитывали методом маршрутного учёта без ограничения полосы обнаружения [11]. В качестве меры количественного обилия птиц использовался показатель «встречаемость» (особей/км).

Результаты и обсуждение

Анализ полученных полевых материалов о видовом составе и количественном обилии птиц обследованных территорий (табл. 1, 2) показывает, что в гористых районах южного берега Варангер-фьорда в гнездовой период встречается не менее 53 видов птиц. К фоновым видам на тундровых и скалистых территориях среди представителей отряда воробьинообразных (табл. 2) относятся луговой конёк *Anthus pratensis*, обыкновенная каменка *Oenanthe oenanthe* и обыкновенная чечётка *Acanthis flammea*. В категорию обычных могут быть отнесены береговой конёк *Anthus petrosus*, варакушка *Luscinia svecica*, пеночка-весничка *Phylloscopus trochilus*. Малочисленны в данных экосистемах района – краснозобый конёк *Anthus cervinus*, белая трясогузка *Motacilla alba*, юрок *Fringilla montifringilla*. В группе редко встречающихся видов представлены – овсянка-крошка *Ocyris pusillus*, белобровик *Turdus iliacus*, зеленушка *Chloris chloris*, серая

Таблица 1 / Table 1

Видовой состав и количество особей неворобьиных птиц на учётных маршрутах в гористых районах южного берега Варангер-Фьорда / Species composition and number of individuals of non-passerine birds on survey routes in mountainous areas of the Varangerfjord southern coast

Вид / Speices	Берёзовые леса Birch forest	Тундровые и скалистые территории Tundra and rocky territories		
	2019 20,4 км km	2019 18,9 км km	2020 24,5 км km	2021 18,0 км km
Краснозобая гагара <i>Gavia stellata</i> (Pontoppidan, 1763)	1pr	1pr	1ind	3pr+5ind
Чернозобая гагара <i>Gavia arctica</i> (Linnaeus, 1758)	4pr	2pr	2pr	1pr
Большой баклан <i>Phalacrocorax carbo</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	20 ind	–
Лебедь-кликун <i>Cygnus cygnus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	2pr+3juv	–
Кряква <i>Anas platyrhynchos</i> (Linnaeus, 1758)	1pr	–	–	–
Хохлатая черныш <i>Aythya fuligula</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	1pr+3♂	–
Луток <i>Mergellus albellus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	3♂	–
Длинноносый крохаль <i>Mergus serrator</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	1♂	–
Зимняк <i>Buteo lagopus</i> (Pontoppidan, 1763)	1ind	–	1ind	–
Беркут <i>Aquila chrysaetos</i> (Linnaeus, 1758)	1ind	–	–	–
Орлан-белохвост <i>Haliaeetus albicilla</i> (Linnaeus, 1758)	1ind	–	2ind	2ind
Обыкновенная пустельга <i>Falco tinnunculus</i> (Linnaeus, 1758)	2ind	1ind	–	–
Белая куропатка <i>Lagopus lagopus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	1♂	–
Тундряная куропатка <i>Lagopus mutus</i> (Montin, 1781)	–	8♂+1♀+2juv	–	3♂
Золотистая ржанка <i>Pluvialis apricaria</i> (Linnaeus, 1758)	1pr	3pr	–	–
Галстучник <i>Charadrius hiaticula</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	1pr+2juv	1pr+2juv
Кулик-сорока <i>Haematopus ostralegus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	2pr+2juv+1ind	4pr
Фифи <i>Tringa glareola</i> (Linnaeus, 1758)	2pr+1♂	–	–	1ind
Большой улит <i>Tringa nebularia</i> (Gunnerus, 1767)	4pr	2pr	–	–
Травник <i>Tringa totanus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	2pr+1ind	2pr
Щеголь <i>Tringa erythropus</i> (Pallas, 1764)	–	1pr	–	–
Перевозчик <i>Actitis hypoleucos</i> (Linnaeus, 1758)	11pr	2pr	–	–
Средний кроншнеп <i>Numenius phaeopus</i> (Linnaeus, 1758)	–	1pr	–	–
Короткохвостый поморник <i>Stercorarius parasiticus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	5pr+2juv+6ind	4pr+1juv
Серебристая чайка <i>Larus argentatus</i> (Pontoppidan, 1763)	1pr	–	50ind	–
Морская чайка <i>Larus marinus</i> (Linnaeus, 1758)	–	1pr	–	–
Сизая чайка <i>Larus canus</i> (Linnaeus, 1758)	6pr	–	2pr	–

Примечания: ♂ – самец, ♀ – самка, pr – пара, juv – птенец, ind – индивидуальная особь, «–» – вид не встречен.
Note: ♂ – male, ♀ – female, pr – pair, juv – nestling, ind – individual, “–” – not detected.

Таблица 2 / Table 2

Встречаемость воробьинообразных птиц (пар/км) в гористых районах южного берега Варангер-Фьорда
Occurrence of passerine birds (pairs/km) in mountainous areas of the Varangerfjord southern coast

Вид / Species	Берёзовые леса Birch forest	Тундровые и скалистые территории Tundra and rocky territories		
	2019 20,4 км km	2019 18,9 км km	2020 24,5 км km	2021 18,0 км km
Полевой жаворонок <i>Alauda arvensis</i> (Linnaeus, 1758)	–	0,05	–	–
Лесной конёк <i>Anthus trivialis</i> (Linnaeus, 1758)	0,64	–	–	–
Луговой конёк <i>Anthus pratensis</i> (Linnaeus, 1758)	0,64	0,74	–	1,61
Краснозобый конёк <i>Anthus cervinus</i> (Pallas, 1811)	–	0,37	–	0,22
Береговой конёк <i>Anthus petrosus</i> (Montagu, 1798)	–	0,42	0,86	0,06
Белая трясогузка <i>Motacilla alba</i> (Linnaeus, 1758)	0,10	–	0,24	0,33
Серая ворона <i>Corvus cornix</i> (Linnaeus, 1758)	0,25	–	0,08	0,11
Ворон <i>Corvus corax</i> (Linnaeus, 1758)	0,10	–	0,04	–
Камышёвка-барсучок <i>Acrocephalus schoenobaenus</i> (Linnaeus, 1758)	0,05	–	–	–
Пеночка-весничка <i>Phylloscopus trochilus</i> (Linnaeus, 1758)	4,80	0,11	0,69	0,06
Серая мухоловка <i>Muscicapa striata</i> (Pallas, 1764)	0,05	–	–	–
Обыкновенная каменка <i>Oenanthe oenanthe</i> (Linnaeus, 1758)	0,29	1,69	0,08	0,17
Обыкновенная горихвостка <i>Phoenicurus phoenicurus</i> (Linnaeus, 1758)	0,20	–	–	–
Варакушка <i>Luscinia svecica</i> (Linnaeus, 1758)	1,47	0,79	0,24	–
Рябинник <i>Turdus pilaris</i> (Linnaeus, 1758)	0,64	–	–	–
Белозобый дрозд <i>Turdus torquatus</i> (Linnaeus, 1758)	0,15	–	–	–
Белобровик <i>Turdus iliacus</i> (Linnaeus, 1766)	0,78	0,05	0,20	–
Певчий дрозд <i>Turdus philomelos</i> (C. L. Brehm, 1831)	0,54	–	0,08	–
Сероголовая гайчка <i>Parus cinctus</i> (Boddaert, 1783)	0,05	–	–	–
Юрок <i>Fringilla montifringilla</i> (Linnaeus, 1758)	4,41	0,11	0,45	–
Обыкновенная зеленушка <i>Chloris chloris</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	0,04	0,06
Чиж <i>Spinus spinus</i> (Linnaeus, 1758)	0,05	–	–	–
Обыкновенная чечётка <i>Acanthis flammea</i> (Linnaeus, 1758)	3,14	1,11	1,14	0,33
Обыкновенный снегирь <i>Pyrrhula pyrrhula</i> (Linnaeus, 1758)	0,05	–	–	–
Камышовая овсянка <i>Schoeniclus schoeniclus</i> (Linnaeus, 1758)	0,20	–	–	–
Овсянка-крошка <i>Ocyris pusillus</i> (Pallas, 1776)	–	0,21	–	–

Примечание: «–» – вид не встречен.
Note: “–” – not detected.

ворона *Corvus cornix*. В период исследований были отмечены единичные встречи певчего дрозда *Turdus philomelos* и полевого жаворонка *Alauda arvensis*.

В этом же биотопе среди неворобьиных наиболее массовыми были серебристая чайка *Larus argentatus* и большой баклан *Phalacrocorax carbo*. Наиболее часто они встречались только на участках, обследованных в 2020 г., что объясняется прилеганием обследуемых территорий к морскому побережью. К обычным видам тундровых и скалистых участков относятся птицы, населяющие озёрные и тундровые экосистемы

этих территорий: чернозобая *Gavia arctica* и краснозобая *Gavia stellata* гагары, тундряная куропатка *Lagopus mutus*, кулик-сорока *Haematopus ostralegus*, золотистая ржанка *Pluvialis apricaria*, галстучник *Charadrius hiaticula*, травник *Tringa totanus* и короткохвостый поморник *Stercorarius parasiticus*. К редко встречаемым видам могут быть отнесены лебедь-кликун *Cygnus cygnus*, хохлатая чернеть *Aythya fuligula*, луток *Mergellus albellus*, орлан-белохвост *Haliaeetus albicilla*, перевозчик *Actitis hypoleucos*, большой улит *Tringa nebularia* и сизая чайка *Larus canus*. В период выполнения работ отмечены единич-

ные встречи длинноносого крохала *Mergus serrator*, белой куропатки *Lagopus lagopus*, фифи *Tringa glareola*, морской чайки *Larus marinus*, зимняка *Buteo lagopus*, обыкновенной пустельги *Falco tinnunculus*, щёголя *Tringa erythropus* и среднего кроншнепа *Numenius phaeopus*.

На обследованных территориях берёзовые леса распространены в понижениях между скалистыми участками, в долинах рек и ручьёв. Здесь фоновыми видами являются пеночка-весничка *Phylloscopus trochilus*, юрок *Fringilla montifringilla* и обыкновенная чечётка *Acanthis flammea*. Среди водоплавающих и околоводных видов, встречающихся на озёрах и в примыкающих болотных экосистемах, наиболее массовыми были перевозчик *Actitis hypoleucos*, сизая чайка *Larus canus*, большой улит *Tringa nebularia*, чернозобая гагара *Gavia arctica*. К обычным видам берёзовых лесов и заболоченных территорий в межгорных понижениях относятся варакушка *Luscinia svecica*, рябинник *Turdus pilaris*, белобровик *Turdus iliacus*, певчий дрозд *Turdus philomelos*, лесной *Anthus trivialis* и луговой *Anthus pratensis* коньки, фифи *Tringa glareola*. В группу редко встречаемых видов в понижениях и долинах рек и ручьёв обследованных территорий могут быть включены белозобый дрозд *Turdus torquatus*, белая трясогузка *Motacilla alba*, ворон *Corvus corax*, ворона серая *Corvus cornix*, обыкновенная каменка *Oenanthe oenanthe*, обыкновенная горихвостка *Phoenicurus phoenicurus*, камышовая овсянка *Schoeniclus schoeniclus*, обыкновенная пустельга *Falco tinnunculus*. В этих же районах отмечены единичные встречи краснозобой гагары *Gavia stellata*, кряквы *Anas platyrhynchos*, зимняка *Buteo lagopus*, орлана-белохвоста *Haliaeetus albicilla*, беркута *Aquila chrysaetos*, золотистой ржанки *Pluvialis apricaria*, серебристой чайки *Larus argentatus*, серой мухоловки *Muscicapa striata*, чижа *Spinus spinus*, обыкновенного снегиря *Pyrrhula pyrrhula*.

Сравнительный анализ полученных материалов с данными исследований других горных территорий Мурманской области [1–9] показывает, что фауна и население птиц в гористых районах южного берега Варангер-фьорда отличаются от внутренних горных районов Мурманской области. Это связано как с сочетанием высокой мозаичности различных типов местообитаний птиц, так и с близостью исследованного района к морскому побережью. Предварительный анализ состава орнитофауны территории проектируемого заказника федерального значения

«Воръема» [12], включающего в том числе обследованные участки, показывает, что здесь потенциально может быть отмечено не менее 107 видов птиц, из которых свыше 20 включены в настоящее время в Красную книгу Мурманской области. Анализ фауны и населения птиц горных районов, тундровой зоны и северных берёзовых лесов [13–16] показывает, с одной стороны, важность этих территорий в сохранении биологического разнообразия севера континентальной Европы в условиях меняющегося климата, с другой – слабую изученность как фаунистического состава этих мест, так и реакций структуры сообществ на трансформирующие климатические и антропогенные факторы. Анализ собственных данных и результаты ранее выполненных работ в сходных по структуре территориях [9, 10, 17] показывают, что в фауне птиц гористых районов южного берега Варангер-фьорда, помимо отмеченных нами, могут быть представлены несколько видов гусеобразных, куликов, дневных хищных птиц и воробьиных.

Помимо фаунистического состава интес представляет сформировавшаяся здесь структура населения птиц. Так, например, на тундровых и скалистых участках вдоль берега Баренцева моря сравнительно часто встречаются два вида коньков (береговой *Anthus petrosus* и краснозобый *A. cervinus*), для которых эти экосистемы, по-видимому, служат основными местами обитания в Мурманской области. Сочетание же тундровых и скалистых участков, а также заболоченных и облесённых территорий создаёт возможность сосуществования на этой территории одновременно четырёх видов коньков, включая лугового *Anthus pratensis* и лесного *A. trivialis*. Таким образом, эта территория может служить хорошей моделью для изучения и оценки влияния климатических изменений и сопутствующих им сукцессионных процессов на ряд совместно обитающих близкородственных видов.

Хорошо известно, что северные участки континентальных районов Европы служат важными местами размножения для целого ряда редких видов птиц [18–22]. Анализ полевых материалов и опубликованных исследований показывает, что тундровые и скалистые районы являются местами размножения поморников, чаек, гагар, ряда видов куликов и уток [21–27]. Обследованные территории служат местами гнездования ряда редких видов птиц: лебедя-кликун *Cygnus cygnus*, лутка *Mergellus albellus*, беркута *Aquila chrysaetos*, орлана-белохвоста *Haliaeetus albicilla*, сапсана

Falco peregrinus, пустельги *F. tinnunculus*, белозобого дрозда *Turdus torquatus*. Потенциально в обследованном районе могут гнездиться кречет *F. rusticolus* и рогатый жаворонок *Eremophila alpestris* [18–20, 29, 30].

Обобщённый анализ данных показывает, что обследованная территория проектируемого заказника «Ворьема» может стать значимой частью кластера особо охраняемых природных территорий (ООПТ) северо-запада Мурманской области, включающего также природный парк «Полуострова Рыбачий и Средний» и Айновы острова Кандалакшского заповедника. Совокупно все эти территории играют большую роль как места размножения и концентрации во внегнездовой период значительного числа краснокнижных видов: большого *Phalacrocorax carbo* и хохлатого *P. aristotelis* бакланов, северной олуши *Sula bassana*, серого гуся *Anser anser*, обыкновенной гаги *Somateria mollissima*, пеганки *Tadorna tadorna*, большого поморника *Stercorarius skua*. Материковые участки этого кластера ООПТ, по предварительной оценке, может населять более десятка пар пустельги *Falco tinnunculus*, белозобого дрозда *Turdus torquatus*, менее 10 пар сапсана *F. peregrinus*, несколько пар кречета *F. rusticolus*, рогатого жаворонка *Eremophila alpestris*, орлана-белохвоста *Haliaeetus albicilla*, отдельные пары беркута *Aquila chrysaetos*.

Заключение

В целом результаты исследования показывают, что обследованные территории гористых районов южного берега Варангер-фьорда перспективны с точки зрения дальнейшего изучения и включения в границы проектируемого заказника федерального значения «Ворьема», обладают характерной структурой населения птиц и служат местами размножения целого ряда редких видов. Включение обследованных участков в границы проектируемого заказника, наряду с участками нижнего течения р. Ворьемы и морского побережья, позволит сформировать целостный объект, включающий в себя все представленные в этом районе типы местообитаний птиц. Организация общего кластера, включающего проектируемый заказник «Ворьема», природный парк «Полуострова Рыбачий и Средний» и Айновы острова Кандалакшского заповедника, позволит взять под охрану и постоянное изучение территории, являющиеся ключевыми в сохранении разнообразия морских птиц и птиц тундровой

зоны в российском секторе северо-западной части материковой Европы.

Работы выполнены при поддержке государственного природного заповедника «Пасвик».

Литература

- Новиков Г.А. Экология птиц Хибинских гор // Труды Зоологического института АН СССР. 1952. Т. 9. № 4. С. 1133–1155.
- Бутьев В.Т. Распределение птиц Хибин по ландшафтам // Учёные записки Московского городского педагогического института имени В.П. Потёмкина. 1959. Т. CIV. С. 123–144.
- Семёнов-Тян-Шанский О.И., Гилязов А.С. Птицы Лапландии. М.: Наука, 1991. 288 с.
- Коханов В.Д. К познанию современной орнитофауны Полярно-альпийского ботанического сада и его окрестностей // Актуальные проблемы сохранения биоразнообразия растительного и животного мира Северной Фенноскандии и сопредельных территорий: доклады международной конференции. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2005. С. 143–149.
- Хлебосолов Е.И., Макарова О.А., Хлебосолова О.А., Поликарпова Н.В., Зацаринный И.В. Птицы Пасвика. Рязань: НП «Голос губернии», 2007. 176 с.
- Витер С.Г. Орнитологические наблюдения в ходе кратковременной экспедиции в Юго-Восточную часть Хибин // Русский орнитологический журнал. 2015. Т. 24. № 1219. С. 4274–4280.
- Зацаринный И.В., Собчук И.С., Большаков А.А., Бульчева И.А., Макарова О.А., Поликарпова Н.В., Варюхин В.С., Грибова М.О., Шаврина У.Ю. Птицы заповедника «Пасвик» и прилегающих территорий // Русский орнитологический журнал. 2018. Т. 27. № 1625. С. 2829–2908.
- Большаков А.А. К орнитофауне Ловозерских тундр // Русский орнитологический журнал. 2019. Т. 28. № 1856. С. 5636–5643.
- Хлебосолов Е.И., Хлебосолова О.А., Макарова О.А., Поликарпова Н.В. Структура населения птиц в горных экосистемах северо-запада Кольского полуострова // Экология, эволюция и систематика животных: сборник научных трудов кафедры зоологии РГУ. Рязань: Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, 2006. С. 22–30.
- Большаков А.А. Орнитологические наблюдения на полуострове Рыбачий в июне 2015 года // Русский орнитологический журнал. 2015. Т. 24. № 1156. С. 2161–2169.
- Равкин Е.С., Челинцев Н.Г. Методические рекомендации по маршрутному учёту населения птиц в заповедниках // Организация научных исследований в заповедниках и национальных парках: сб. докл. семинара-совещания. М.: Всемир. фонд дикой природы, 1999. С. 143–155.
- Зацаринный И.В., Поликарпова Н.В., Толмачева Е.Л., Большаков А.А., Шаврина У.Ю., Варюхин В.С.

Роль ООПТ Мурманской части Зелёного пояса Фенноскандии в сохранении разнообразия редких видов птиц // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 4. С. 129–143. doi: 10.17076/them1013

13. Lehikoinen A., Green M., Husby M., Kålås J.A., Lindström Å. Common montane birds are declining in northern Europe // *J. Avian Biol.* 2014. V. 45. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.1600-048X.2013.00177.x

14. Lehikoinen A., Brotons L., Calladine J., Campedelli T., Escandell V., Flousek J., Grueneberg C., Haas F., Harris S., Herrando S., Husby M., Jiguet F., Kålås J.A., Lindström Å., Lorrillière R., Molina B., Pladevall C., Calvi G., Sattler T., Schmid H., Sirkkiä P.M., Teufelbauer N., Trautmann S. Declining population trends of European mountain birds // *Glob. Chang. Biol.* 2019. V. 25. No. 2. P. 577–588. doi: 10.1111/gcb.14522

15. Lien L., Østbye E., Hagen A., Klemetsen A., Skar H.-J. Quantitative bird surveys in high mountain habitats, Finse, South Norway, 1967–68 // *Norwegian Journal of Zoology*. 1970. V. 18. P. 245–251.

16. Lien L., Østbye E., Hogstad O., Haande K.M., Haande P.S., Hagen A., Skar H.-J., Skartveit A., Svalastog D. Bird surveys in the high mountain habitats of Finse and Stigstuv, Hardangervidda, South Norway, 1967–1972 // *Norwegian Journal of Zoology*. 1972. V. 22. P. 1–14.

17. Большаков А.А. Орнитологические наблюдения на полуострове Рыбачий летом 2020 года // *Русский орнитологический журнал*. 2022. Т. 31. № 2216. С. 3515–3522.

18. Минеев О.Ю., Минеев Ю.Н., Кочанов С.К. Распространение, численность и охрана соколообразных птиц (Falconiformes) в Ненецком автономном округе // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 1. С. 65–72. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-065-072

19. Морозов В.В. Кречет *Falco rusticolus* Gyrfalcon // *Атлас гнездящихся птиц европейской части России*. М.: Фитон XXI, 2020. С. 221–222.

20. Морозов В.В. Сапсан *Falco peregrinus* Peregrine Falcon // *Атлас гнездящихся птиц европейской части России*. М.: Фитон XXI, 2020. С. 222–224.

21. Byrkjedal I., Högstedt G. Numbers of Horned Lark *Eremophila alpestris* are increasing at high alpine and arctic breeding sites in Norway // *Ornis Norvegica*. 2022. V. 45. P. 10–15. doi: 10.15845/on.v45i0.3640

22. Flousek J., Telenský T., Hanzelka J., Reif J. Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species // *PLoS One*. 2015. V. 10. No. 10. Article No. e0139465. doi: 10.1371/journal.pone.0139465

23. Lehikoinen A., Fraixedas S., Burgas D., Eriksson H., Henttonen H., Laakkonen H., Lehikoinen P., Lehtomäki J., Santaharju J., Mäkeläinen S., Niemimaa J., Pihlajaniemi M., Santaharju J., Välimäki K. The impact of weather and the phase of the rodent cycle on breeding populations of waterbirds in Finnish Lapland // *Ornis Fennica*. 2016. V. 93. P. 31–46. doi: 10.51812/of.133886

24. Lindström Å., Green M., Husby M., Kålås J., Lehikoinen A. Large-scale monitoring of waders on their boreal and arctic breeding grounds in Northern Europe // *Ardea*. 2015. V. 103. No. 1. P. 3–15. doi: 10.5253/arde.v103i1.a1

25. Зацаринный И.В., Собчук И.С., Булычева И.А., Варюхин В.С., Макарова О.А., Бычков Ю.М. Корнифоауна горных территорий заповедника «Пасвик» // *Русский орнитологический журнал*. 2016. Т. 25. № 1258. С. 817–824.

26. Зацаринный И.В., Шаврина У.Ю., Валова Е.В., Натальская О.В., Зацаринная Е.А. Водоплавающие и околоводные птицы отдельных участков южного берега Варангер-фьорда // *Русский орнитологический журнал*. 2022. Т. 31. № 2148. С. 113–117.

27. Fauchald P., Anker-Nilssen T., Barrett R., Bustnes J., Bårdsen B., Christensen-Dalsgaard S., Descamps S., Engen S., Erikstad K., Hanssen S., Lorentse, S., Moe B., Reiertsen T., Strøm H., Systad G. The status and trends of seabirds breeding in Norway and Svalbard. NINA Report 1151, 2015. 84 p.

28. Klemetsen A., Knudsen R. Diversity and abundance of water birds in a subarctic lake during three decades // *Fauna Norvegica*. 2013. V. 33. P. 21–27. doi: 10.5324/in.v33i0.1584

29. Красная книга Мурманской области / Отв. ред. Н.А. Константинова, А.С. Корякин, О.А. Макарова, В.В. Бианки. Кемерово: Азия-принт, 2014. 584 с.

30. Koskimies P. Research on conservation biology of the Gyrfalcon (*Falco rusticolus*) in northern Fennoscandia: present status and future prospects // *Status of Raptor Populations in Eastern Fennoscandia: proceedings of the workshop*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 56–69.

References

1. Novikov G.A. Ecology of birds of the Khibiny Mountains // *Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*. 1952. V. 9. No. 4. P. 1133–1155 (in Russian).

2. Butyev V.T. Distribution of Khibiny birds across landscapes // *Uchenye zapiski Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo instituta imeni V.P. Potemkina*. 1959. V. CIV. P. 123–144 (in Russian).

3. Semenov-Tyan-Shansky O.I., Gilyazov A.S. Birds of Lapland. Moskva: Nauka, 1991. 288 p. (in Russian).

4. Kohanov V.D. Towards the knowledge of the modern ornithofauna of the Polar-Alpine Botanical Garden and its surroundings // *Aktualnye problemy sokhraneniya bioraznoobraziya rastitelnogo i zhivotnogo mira Severnoy Fennoskandii i sopredelnykh territoriy: Doklady mezhdunarodnoy konferentsii*. Moskva: Tovarichestvo nauchnykh izdatelstv KMK, 2005. P. 143–149 (in Russian).

5. Khlebosolov E.I., Makarova O.A., Khlebosolova O.A., Polikarpova N.V., Zatsarinny I.V. Birds of Pasvik. Ryazan: NP “Golos gubernii”, 2007. 176 p. (in Russian).

6. Viter S.G. Ornithological observations in the course of short-term expedition to the South-Eastern part of the Khibiny // *Russkiy ornitologicheskiy zhurnal*. 2015. V. 24. No. 1219. P. 4274–4280 (in Russian).

7. Zatsarinny I.V., Sobchuk I.S., Bolshakov A.A., Bulycheva I.A., Makarova O.A., Polikarpova N.V., Varyukhin V.S., Gribova M.O., Shavrina U.Yu. Birds of the Pasvik Nature Reserve and adjacent territories // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2018. V. 27. No. 1625. P. 2829–2908 (in Russian).
8. Bolshakov A.A. On the avifauna of Lovozersk tundra // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2019. V. 28. No. 1856. P. 5636–5643 (in Russian).
9. Khlebosolov E.I., Khlebosolova O.A., Makarova O.A., Polikarpova N.V. Structure of bird population in mountain ecosystems of the north-west of the Kola Peninsula // *Ecology, evolution and systematics of animals: sbornik nauchnykh trudov kafedry zoologii RGU*. Ryazan: Ryazanskiy gosudarstvennyy universitet imeni S.A. Esenina, 2006. P. 22–30 (in Russian).
10. Bolshakov A.A. Ornithological observations on the Rybachy Peninsula in June 2015 // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2015. V. 24. No. 1156. P. 2161–2169 (in Russian).
11. Ravkin E.S., Chelintsev N.G. Methodological recommendations on route accounting of the bird population in nature reserves // *Organization of scientific research in nature reserves and national parks: sbornik dokladov seminarasoveshchaniya*. Moskva: Vsemirnyi fond dikoi prirody, 1999. P. 143–155 (in Russian).
12. Zatsarinny I.V., Polikarpova N.V., Tolmacheva E.L., Bolshakov A.A., Shavrina U.Y., Varyukhin V.S. The role of special protected areas of the Murmansk part of the Green Belt of Fennoscandia in the diversity conservation of rare bird species // *Transactions of KarRC RAS*. 2019. No. 4. P. 129–143 (in Russian). doi: 10.17076/them1013
13. Lehtikoinen A., Green M., Husby M., Kålås J.A., Lindström Å. Common montane birds are declining in northern Europe // *J. Avian Biol.* 2014. V. 45. No. 1. P. 3–14. doi: 10.1111/j.1600-048X.2013.00177.x
14. Lehtikoinen A., Brotons L., Calladine J., Campedelli T., Escandell V., Flousek J., Grueneberg C., Haas F., Harris S., Herrando S., Husby M., Jiguet F., Kålås J.A., Lindström Å., Lorrillière R., Molina B., Pladevall C., Calvi G., Sattler T., Schmid H., Sirkkiä P.M., Teufelbauer N., Trautmann S. Declining population trends of European mountain birds // *Glob. Chang. Biol.* 2019. V. 25. No. 2. P. 577–588. doi: 10.1111/gcb.14522
15. Lien L., Østbye E., Hagen A., Klemetsen A., Skar H.-J. Quantitative bird surveys in high mountain habitats, Finse, South Norway, 1967–68 // *Norwegian Journal of Zoology*. 1970. V. 18. P. 245–251.
16. Lien L., Østbye E., Hogstad O., Haande K.M., Haande P.S., Hagen A., Skar H.-J., Skartveit A., Svalastog D. Bird surveys in the high mountain habitats of Finse and Stigstuv, Hardangervidda, South Norway, 1967–1972 // *Norwegian Journal of Zoology*. 1972. V. 22. P. 1–14.
17. Bolshakov A.A. Ornithological observations on the Rybachy Peninsula in the summer of 2020 // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2022. V. 31. No. 2216. P. 3515–3522 (in Russian).
18. Mineev O.Y., Mineev Y.N., Kochanov S.K. Distribution, number and protection of the Falconiformes in Nenets Autonomous district // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 65–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-065-072
19. Morozov V.V. Gyrfalcon *Falco rusticolus* // *Atlas of Breeding Birds of the European Part of Russia 2020*. Moskva: Fiton XXI, 2020. P. 221–222 (in Russian).
20. Morozov V.V. Peregrine Falcon *Falco peregrinus* // *Atlas of Breeding Birds of the European Part of Russia 2020*. Moskva: Fiton XXI, 2020. P. 222–224 (in Russian).
21. Byrkjedal I., Högstedt G. Numbers of Horned Lark *Eremophila alpestris* are increasing at high alpine and arctic breeding sites in Norway // *Ornis Norvegica*. 2022. V. 45. P. 10–15. doi: 10.15845/on.v45i0.3640
22. Flousek J., Telenský T., Hanzelka J., Reif J. Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species // *PLoS One*. 2015. V. 10. No. 10. Article No. e0139465. doi: 10.1371/journal.pone.0139465
23. Lehtikoinen A., Fraixedas S., Burgas D., Eriksson H., Henttonen H., Laakkonen H., Lehtikoinen P., Lehtomäki J., Santaharju J., Mäkeläinen S., Niemimaa J., Pihlajaniemi M., Santaharju J., Välimäki K. The impact of weather and the phase of the rodent cycle on breeding populations of waterbirds in Finnish Lapland // *Ornis Fennica*. 2016. V. 93. P. 31–46. doi: 10.51812/of.133886
24. Lindström Å., Green M., Husby M., Kålås J., Lehtikoinen A. Large-scale monitoring of waders on their boreal and arctic breeding grounds in Northern Europe // *Ardea*. 2015. V. 103. No. 1. P. 3–15. doi: 10.5253/arde.v103i1.a1
25. Zatsarinny I.V., Sobchuk I.S., Bulycheva I.A., Varyukhin V.S., Makarova O.A., Bychkov Yu.M. By the avifauna of the mountain territories of the Pasvik Reserve // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2016. V. 25. No. 1258. P. 817–824 (in Russian).
26. Zatsarinny I.V., Shavrina U.Yu., Valova E.V., Natal'skaya O.V., Zatsarinnaya E.A. Water birds of some sections of the southern coast of the Varangerfjord // *Russkiy ornitologicheskii zhurnal*. 2022. V. 31. No. 2148. P. 113–117 (in Russian).
27. Fauchald P., Anker-Nilssen T., Barrett R., Bustnes J., Bårdsen B., Christensen-Dalsgaard S., Descamps S., Engen S., Erikstad K., Hanssen S., Lorentse S., Moe B., Reiertsen T., Strøm H., Systad G. The status and trends of seabirds breeding in Norway and Svalbard. NINA Report 1151, 2015. 84 p.
28. Klemetsen A., Knudsen R. Diversity and abundance of water birds in a subarctic lake during three decades // *Fauna Norvegica*. 2013. V. 33. P. 21–27. doi: 10.5324/fn.v33i0.1584
29. The Red Book of the Murmansk region / Eds. N.A. Konstantinova, A.S. Koryakin, O.A. Makarova, V.V. Bianki. Kemerovo: Asia-print, 2014. 584 p. (in Russian).
30. Koskimies P. Research on conservation biology of the Gyrfalcon (*Falcorusticolus*) in northern Fennoscandia: present status and future prospects // *Status of Raptor Populations in Eastern Fennoscandia: proceedings of the workshop*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 56–69.

Влияние загрязнённой радионуклидами среды на сердечный ритм детей в современных условиях

© 2024. О. В. Калабин¹, к. б. н., доцент, Ф. Б. Литвин², д. б. н., профессор, Т. М. Брук², д. б. н., зав. кафедрой, И. В. Быкова³, к. б. н., доцент, Е. В. Удовенко³, к. б. н., доцент,

¹Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Смоленский государственный университет спорта, 214018, Россия, г. Смоленск, проспект Гагарина, д. 23,
³Брянский государственный технический университет, 241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7, e-mail: bf-litvin@yandex.ru

Целью исследования явилось изучение особенностей variability сердечного ритма у мальчиков и девочек 8-летнего и 10-летнего возраста, постоянно проживающих на территориях с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения. Функции организма формируются при тесном взаимодействии организма и среды. Совершенствование адаптивных реакций развивающегося организма происходит на каждом этапе онтогенеза по мере усложнения его контактов с окружающей средой. В ходе работы обнаружены особенности регуляции сердечного ритма в зависимости от района проживания. У девочек 8 лет и 10 лет из радиоэкологически благополучных районов усиливается вклад автономного контура регуляции сердечного ритма, что, исходя из принципа функционального антагонизма, приводит к ослаблению центрального контура регуляции. У 8-летних девочек из радиоэкологически неблагополучных районов градиент сдвига показателей выше по сравнению с 10-летними, что отражает большую чувствительность их организма к воздействию неблагоприятных факторов. У мальчиков 8 лет и 10 лет из радиоэкологически благополучных районов, как и у девочек, доминирует автономный контур регуляции. В отличие от девочек у мальчиков из радиоэкологически неблагополучных районов обнаружен дисбаланс в работе регуляторных механизмов с усилением центрального контура регуляции. Увеличение градиента сдвига изученных показателей у мальчиков из радиоэкологически неблагополучных регионов приходится на возраст 10 лет. По результатам исследования выявлены гендерные различия в регуляции сердечного ритма. Полученные данные являются важными диагностическими аспектами морфофункционального созревания организма для последующих этапов онтогенеза в зависимости от экологических условий проживания.

Ключевые слова: возраст, пол, радиация, variability ритма сердца, радиоэкологические условия проживания.

The effect of radionuclide-contaminated environment on children's heart rate

© 2024. O. V. Kalabin¹ ORCID: 0000-0002-5383-5007, F. B. Litvin² ORCID: 0000-0002-2281-8757, T. M. Bruk² ORCID: 0000-0003-1023-6642, I. V. Bykova³ ORCID: 0000-0001-8332-1827, E. V. Udovenko³ ORCID: 0000-0002-6021-2481

¹Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Smolensk State University of Sports, 23, Gagarina Avenue, Smolensk, Russia, 214018,
³Bryansk State Technical University, 7, Boulevard 50 let Oktyabrya, Bryansk, Russia, 241035, e-mail: bf-litvin@yandex.ru

The main aim was to study the characteristics of heart rate variability in 8- and 10-year boys and girls that permanently reside in areas with an increased level of radioactive contamination. The body functions are formed by close interaction of the body and the environment. The adaptive responses of the developing organism are improved at each ontogenetic stage as its contact with the environment become more complex. We found that features of heart rate regula-

tion depend on the area of residence. The contribution of the autonomous circuit of heart rate regulation is increased for 8- and 10-year-old girls from radio-ecologically safe areas (RESA). Based on the principle of functional antagonism this leads to a weakening of the central circuit of regulation. The shift gradient of indicators is higher for 8-year-old girls from radio-ecologically unfavorable areas (REUA) compared to 10-year-old girls. This reflects the greater sensitivity of their organism to adverse factors. The dominance of the autonomous circuit of regulation was marked for 8- and 10-year-old boys from the RESA. In contrast an imbalance in the operation of regulatory mechanisms with an increase in the central regulatory circuit was found for boys from the REUA. High centralization of cardiac control indicates that adaptation mechanisms are in a state of pronounced tension. The increase in the shift gradient for boys from REUA falls at the age of 10 years. The results of the study revealed gender differences in the regulation of heart rhythm. The obtained data is important diagnostic aspects of morphofunctional maturation of the organism for subsequent ontogenetic stages depending on environmental living conditions.

Keywords: age, sex, radiation, heart rate variability, radio-ecological living conditions.

Проблема биологических эффектов малых доз ионизирующей радиации в настоящее время является одной из центральных при создании системы медико-экологического мониторинга и оценки риска радиационного воздействия [1]. Хроническое облучение в малых дозах может быть более опасным по последствиям, чем кратковременное облучение в больших дозах [2]. Известно, что состояние сердечно-сосудистой системы является объективным индикатором гомеостаза организма [2, 3]. В связи с этим актуальными представляются результаты отдельных исследований по оценке состояния вегетативной нервной системы, которые позволяют трактовать данные изменения как адекватный ответ сердечно-сосудистой системы испытуемых на воздействие экологических факторов среды [4–6]. Нейрогуморальные механизмы регуляции сердечного ритма относятся к разряду активно изучаемых проблем в экологии и физиологии [7, 8]. Несмотря на прошедшие 37 лет после Чернобыльской катастрофы, на радиоактивно загрязнённых территориях России, Украины и Беларуси проживает без малого 5 млн человек [9]. Разработки ведущих специалистов свидетельствуют о том, что плотность радиоактивного загрязнения цезием-137 (^{137}Cs) и стронцием-90 (^{90}Sr) будет оставаться радиоэкологически значимой на протяжении десятилетий [9, 10]. В настоящее время на радиоактивно загрязнённых территориях Брянской области проживает более 300 тыс. чел. [12]. Регулярный радиоэкологический мониторинг в Брянской области указывает на то, что плотность загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr на юго-западных территориях (ЮЗТ) в 2023 г. существенно превышает установленные радиологические пределы (критерии отнесения территорий к зонам радиоактивного загрязнения), как для ^{137}Cs (до 37 кБк/м²), так и для ^{90}Sr (до 5,6 кБк/м²) [13, 14]. Спустя 37 лет после аварии на ЧАЭС накопленные дозы облучения населения колеблются в диапазоне от

единиц до сотен мЗв [13, 14, 15]. В частности, в г. Новозыбкове средняя плотность радиоактивного загрязнения ^{137}Cs за 2000–2019 гг. составляет 456,5 кБк/м², а ^{90}Sr 9,7 кБк/м² [16]. На 01.01.2023 г. плотность радиоактивного загрязнения в г. Новозыбкове 321,9 (^{137}Cs) и 7,03 (^{90}Sr) кБк/м² соответственно [12], при этом величина среднегодовой эффективной дозы (СГЭД₉₀) в 2020 г. составляла 0,96 мЗв [13]. Действие малых доз ионизирующего излучения вызывает напряжение регуляторных механизмов сердечно-сосудистой системы. У детей отмечены максимально выраженные признаки сосудистой дистонии, снижения пульсового кровенаполнения сосудов конечностей [17].

Целью исследования явилось изучение особенностей вариабельности сердечного ритма (ВСР) у мальчиков и девочек восьми и десятилетнего возраста, постоянно проживающих на территориях с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения.

Объекты и методы исследования

Работа выполнена на базе школ г. Брянска и г. Новозыбкова в 2021 г. Выборку детей из радиоэкологически неблагоприятного г. Новозыбкова Брянской области (РЭНР) составили девочки в количестве 19 испытуемых 8-летнего возраста и 23 испытуемых 10-летнего возраста. Группа мальчиков из г. Новозыбкова (РЭНР) включала 25 испытуемых 8-летнего возраста и 22 испытуемых 10-летнего возраста. В выборку детей из радиоэкологически благополучных районов (РЭБР) вошло 36 девочек 8-летнего возраста и 28 девочек 10-летнего возраста из г. Брянска. В группу мальчиков из РЭБР входило 44 мальчика 8-летнего возраста и 26 мальчиков 10-летнего возраста из г. Брянска. Все испытуемые обучались в классах без профилизации. Уровень физической активности ограничивался занятиями физической культурой на школьных уроках физической

культуры. Исследования проводили с соблюдением этических медико-биологических норм, изложенных в Хельсинкской декларации и Директивах Европейского сообщества. Все обследуемые и их родители предварительно были информированы о целях, задачах, методах проводимых исследований, о существующей возможности отказаться от дальнейшего участия на любом из этапов работ. Своё добровольное согласие на участие в исследовании испытуемые подтверждали письменно. В случае наличия хронических сердечно-сосудистых заболеваний или несогласия родителей, обследуемые в списки не вносились. Исследования по двум возрастным группам ВСР проводились с применением аппарата «Варикард 2.51» и программного обеспечения «ИСКИМ 6», в котором представлены основные результаты анализа ВСР, ООО «ИВНМТ «Рамена» (г. Рязань). Интерпретацию полученных данных проводили по показателям ВСР: ЧСС – частота сердечных сокращений, МхDMn – разность между максимальным и минимальным значениями кардиоинтервалов, или вариационный размах, мс; TP – суммарная мощность спектра временных значений R-R-интервалов, мс²;

HF – мощность спектра высокочастотных волн (0,4–0,15 Гц), мс², LF – мощность спектра низкочастотных волн (0,15–0,04 Гц), мс²; VLF – мощность спектра очень низкочастотных волн (0,04–0,015 Гц), мс²; LF/HF – показатель симпато-парасимпатического баланса, усл. ед.; SI – индекс напряжения регуляторных систем, усл. ед.; RMSSD – квадратный корень из суммы разностей последовательного ряда кардиоинтервалов, мс; АМо – амплитуда моды, %. Полученные данные обработаны с применением t-критерия Стьюдента. При проверке статистических гипотез критическим был принят уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Изучение регуляторных механизмов имеет приоритетное значение, поскольку гемодинамические, метаболические, энергетические отклонения в органах и системах первоначально возникают в регуляторных системах. Для оценки механизмов регуляции сердца использовали метод variability сердечного ритма, который имеет важное прогностическое значение при оценке функциональных возможностей организма при его адаптации

Таблица 1 / Table 1

Среднестатистические показатели, характеризующие регуляцию сердечного ритма у девочек в возрасте 8 лет и 10 лет, проживающих в разных радиоэкологических условиях проживания (M±m) / Average heart rate variation indicators in 8- and 10-year girls living in different radioecological conditions (M±m)

Показатели ВСР HRV indicators	Возраст, лет, район проживания / Age, years, area of residence			
	8, РЭБР 8, RESA	8, РЭНР 8, REUA	10, РЭБР 10, RESA	10, РЭНР 10, REUA
ЧСС, уд./мин. Heart rate, beat/min	91,6±2,5	97±4	88,3±2,3	94,5±3,6
МхDMn, мс / ms	250±18	242±20	313±21	285±24
RMSSD, мс / ms	49±6	43±4	65±6	58±6
TP, мс ² / ms ²	2703±440	2712±401	3904±422	3312±431
SI, усл. ед. / conl. ed.	178±29	329±55*	125±27	219±37*
АМо, %	45±4	54±8	38,5±3,6	48±5
HF, мс ² / ms ²	1268±285	1303±224	2105±290	1429±239
LF, мс ² / ms ²	888±164	795±129	1079±112	1073±145
LF/HF, усл. ед. / conl. ed.	0,9±0,2	0,8±0,1	0,7±0,1	0,6±0,1
VLF, мс ² / ms ²	375±66	376±72	358±45	402±55

Примечание к таблицам 1 и 2: ВСР – вариабельность сердечного ритма, ЧСС – частота сердечных сокращений, МхDMn – вариационный размах, RMSSD – среднеквадратичное различие между длительностью соседних R-R интервалов, TP – суммарная спектральная мощность, SI – индекс напряжения регуляторных систем, АМо – значение амплитуды моды, HF – спектральная мощность высокочастотных колебаний, LF – спектральная мощность низкочастотных колебаний, LF/HF – симпато-парасимпатический баланс, VLF – спектральная мощность очень низкочастотных колебаний, РЭБР – радиоэкологически благополучный район, РЭНР – радиоэкологически неблагоприятный район, * – достоверные различия относительно значений в РЭБР ($p < 0,05$).

Note for tables 1 and 2: HRV – heart rate variability, HR – heart rate, МхDMn – variation range, RMSSD – RMS difference between the duration of neighboring R-R intervals, TP – total spectral power, SI – stress index, АМо – amplitude value of the mode, HF – spectral power of highfrequency oscillations, LF – spectral power of lowfrequency oscillations, LF/HF – sympatho-parasympathetic balance, VLF – spectral power of very lowfrequency oscillations, RESA – radioecologically safe area, REUA – radioecologically unfavorable area, * – significant differences relative to the values in RESA ($p < 0,05$).

Таблица 2 / Table 2

Среднестатистические показатели, характеризующие регуляцию сердечного ритма у мальчиков в возрасте 8 лет и 10 лет, проживающих в разных радиоэкологических условиях (M±m)
Average heart rate variation indicators in 8- and 10-year boys living in different radioecological conditions (M±m)

Показатели ВСР HRV indicators	Возраст, лет, район проживания / Age, years, area of residence			
	8, РЭБР 8, RESA	8, РЭНР 8, REUA	10, РЭБР 10, RESA	10, РЭНР 10, REUA
ЧСС, уд./мин. Heart rate, beat/min	92,1±2,8	88,4±1,7	83,5±2,4	90,8±2,7
MxDMn, мс / ms	227,5±16,4	262,2±20,2	339,0±22,7	252,5±19,6*
RMSSD, мс / ms	43,0±4,2	55,8±6,2	66,1±6,1	41,0±4,0*
TP, мс ² / ms ²	1969,8±324,2	2737,0±393,6	3885,3±394,5	2497,6±330,5*
SI, усл. ед. / conl. ed.	192,2±39,1	157,0±33,9	102,8±29,6	254,3±50,0*
АМо, %	48,9±4,4	41,6±4,2	35,7±3,8	52,5±5,4*
HF, мс ² / ms ²	863,1±157,3	1434,7±271,6	2134,5±294,2	1019,8±192,2*
LF, мс ² / ms ²	725,6±126,2	804,9±118,8	973,5±90,1	895,9±115,9
LF/HF, усл. ед. / conl. ed.	1,4±0,5	1,0±0,2	0,6±0,1	1,1±0,1*
VLF, мс ² / ms ²	287,7±57,4	308,4±55,6	479,2±56,1	319,4±46,5*

к изменяющимся условиям окружающей среды, в том числе и воздействию малых доз радиации. Индикатором этих отклонений является сердечный ритм [18, 19]. У девочек 8-летнего возраста, проживающих на территориях радиоэкологического загрязнения, по показателям ВСР отмечается устойчивая тенденция усиления центрального механизма регуляции работы сердца на фоне снижения автономного механизма. В результате достоверно на 84% ($p < 0,05$) повышается интегральный показатель стресс-индекса (табл. 1).

Усиление напряжённости в регуляции сердца приводит к снижению активности автономного контура регуляции, о чём свидетельствует снижение средних значений показателей MxDMn, RMSSD, при одновременном повышении АМо. В литературе научные подходы к механизмам регуляции сердечного ритма у девочек 8-летнего возраста диаметрально противоположные. По данным одних исследователей, у девочек 8-летнего возраста доминирует влияние блуждающего нерва, который играет роль защитного адаптационно-трофического действия [20, 21]. Усиление парасимпатического влияния на сердечный ритм свидетельствует об устойчивости организма к стрессирующим факторам [21, 22]. По другим данным в 8-летнем возрасте уровень вегетативной регуляции несовершенен, поскольку преобладает симпатикотонический тип [23]. Такой тип вегетативной регуляции сердечного ритма авторы рассматривают как отражение выраженного напряжения адаптационных механизмов. При переходе в группу 10-летних девочек у испытуемых из РЭБР регистрируется

усиление активности автономного механизма регуляции, которое сопровождается снижением на 44% ($p > 0,05$) показателя SI по сравнению с девочками 8-летнего возраста из РЭБР. У девочек 10 лет из РЭНР, так же, как и в группе 8-летних девочек из РЭНР, усиливается активность центрального механизма регуляции с понижением активности автономного механизма. В итоге интегративный показатель напряжённости организма SI повышается на 76% ($p < 0,05$).

Таким образом, у девочек 8 лет и 10 лет, проживающих в РЭНР, усиливается вклад центрального механизма регуляции сердечного ритма, включающего в себя симпатический отдел ВНС, а также подкорковые и корково-гуморальные центры. В результате достоверно повышается показатель стресс-индекса в обеих возрастных группах.

У мальчиков 8-летнего возраста из РЭНР повышается активность автономного контура регуляции с тенденцией роста показателей MxDMn на 15% ($p > 0,05$), RMSSD – на 30% ($p > 0,05$) и HF – на 66% ($p > 0,05$) (табл. 2). На этом фоне снижаются симпатические влияния на сердечную мышцу. В результате показатель АМо снижается на 18% ($p > 0,05$) и SI на 22% ($p > 0,05$) Незначительно, на 8% ($p > 0,05$), повышается показатель VLF, указывая на тенденцию роста адаптивного состояния. Временное повышение активности парасимпатического отдела в регуляции сердечного ритма у мальчиков 8-летнего возраста, возможно, связано с активацией защитных систем организма. Явление «радиационного гормезиса», при котором малые дозы ионизирующего излучения могут индуцировать

положительные биологические процессы и оказывать стимулирующее благоприятное действие на организм, скорее следует рассматривать как гиперфункциональный эффект ионизирующего облучения при малых дозах, а не как «благоприятное» действие радиации [24]. Особый интерес, требующий дальнейшего развития, вызывает известный подход с позиций формирования в ЦНС в «критический период» онтогенеза потенциально востребованных программ нейрогуморальной регуляции. Под влиянием внешних и внутренних факторов реализация этих программ может избирательно идти по типу быстрой или медленной мобилизации [25]. Переход в возрастную группу 10-летних мальчиков из РЭНР отмечается выраженным усилением центрального механизма регуляции, что приводит к росту напряжённости организма. Усиление симпатических влияний на регуляцию сердца приводит к повышению на 47% ($p < 0,05$) показателя АМо и на 147% ($p < 0,05$) показателя SI. Суммарная мощность спектра снижается на 56% ($p < 0,05$), а показатель усиления энергодефицитного состояния VLF снижается на 50% ($p < 0,05$). Высокая централизация управления работой сердца свидетельствует о том, что адаптационные механизмы находятся в состоянии выраженного напряжения. Известно, что мальчики менее устойчивы к стрессу, что и отражается в выраженном нарушении вегетативной регуляции сердечного ритма.

Заключение

Результаты нашей работы демонстрируют возможное влияние малых доз радиации на становление вегетативной регуляции сердечного ритма, как одно из проявлений гомеостаза в целом. На возрастном отрезке от 8 до 10 лет у девочек усиливается вклад автономного контура регуляции, у мальчиков, напротив, растёт активность центрального контура регуляции. Данный факт предположительно отражает разную устойчивость детского организма к воздействию малых доз радиации, которая, по данным ВСП, оказалась выше у девочек.

Литература

1. Кострюкова Н.К., Карпин В.А. Биологические эффекты малых доз ионизирующего излучения // Сибирский медицинский журнал. 2005. Т. 50. № 1. С. 17–22.
2. Lerman A., Zeiher A.M. **Endothelial function: cardiac events** // *Circulation*. 2005. V. 111. No. 3. P. 363–368. doi: 10.1161/01.CIR.0000153339.27064.14
3. Липунова А.С., Болдуева С.А., Леонова И.А., Колесниченко М.Г., Рыжкова Д.В., Кечерукова А.В., Манасян А.Г., Феоктистова В.С., Петрова В.Б., Захарова О.В. **Роль дисфункции эндотелия в генезе кардиального синдрома X** // Профилактическая и клиническая медицина. 2013. № 1 (46). С. 38–42.
4. Kalabin O.V., Litvin F.V., Brook T.M., Bykova I.V., Udovenko E.V. Influence of radioecological pollution on heart rate variability in young men of different somatotypes // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 232–237. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-232-239
5. Корсаков А.В., Домахина А.С., Трошин В.П., Гегерь Э.В. Заболеваемость детского и взрослого населения Брянской области в зависимости от уровней радиационного, химического и сочетанного загрязнения: экологическое исследование // Экология человека. 2020. № 7. С. 4–14. doi: 10.33396/1728-0869-2020-7-4-14
6. Литвин Ф.Б., Брук Т.М., Терехов П.А., Быкова И.В. Динамика вариабельности сердечного ритма в течение учебного года у мальчиков 8–9 летнего возраста из разных радиоэкологических мест проживания // Культура физическая и здоровье. 2019. № 4 (72). С. 152–154.
7. Аверьянова И.В., Максимов А.Л. Показатели сердечно-сосудистой системы и кардиоритма у юношей г. Магадана с различными типами конституции // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27. № 3. С. 397–409. doi: 10.15507/0236-2910.027.201703.397-409
8. Новые методы электрокардиографии / под. ред. С.В. Грачева, Г.Г. Иванова, А.Л. Сыркина. М.: Техносфера, 2007. 552 с.
9. Яблоков А.В., Нестеренко В.Б., Нестеренко А.В., Преображенская Н.Е. Чернобыль: последствия Катастрофы для человека и природы. Москва: КМК, 2016. 826 с.
10. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси / Под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. М.: Фонд «Инфосфера – НИА – Природа»; Мн.: Белкартография, 2009. 140 с.
11. Города и районы Брянской области: статистический сборник. Брянск: ИИЦ Брянскстата, 2022. 255 с.
12. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240 / Ред. В.Н. Яхрюшин. Обнинск: ФГБУ «НПО Тайфун», 2023. 228 с.
13. Трапезникова Л.Н. Дозы облучения населения Брянской области от различных источников ионизирующего излучения за 2020 год (информационный справочник). Брянск: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Брянской области, 2021. 51 с.
14. Романович И.К., Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Динамика средних годовых и накопленных доз облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 3. С. 33–38. doi: 10.35627/2219-5238/2020-324-3-33-38

15. Korsakov A.V., Geger E.V., Lagerev D.G., Pugach L.I., Mousseau T.A. *De novo* congenital malformation frequencies in children from the Bryansk region following the Chernobyl disaster (2000–2017) // *Heliyon*. 2020. V. 6. No. 8. Article No. e04616. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04616

16. Корсаков А.В., Крюкова А.Е., Трошин В.П., Милушкина О.Ю., Лагерева Д.Г. Первичная заболеваемость злокачественными новообразованиями шейки матки населения, проживающего на экологически неблагополучных территориях (2000–2020 гг.) // *Гигиена и санитария*. 2023. Т. 102. № 1. С. 14–21. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-14-21

17. Корнев Н.М., Бориско Г.А., Кашина-Ярмак В.Л. Состояние здоровья детей, рождённых в семьях родителей, облучённых вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // *Здоровье ребенка*. 2012. № 6. С. 66–70.

18. Волокитина Т.В., Грибанов А.В. Вариабельность сердечного ритма у детей младшего школьного возраста: монография. Архангельск: Поморский университет, 2004. 194 с.

19. Волокитина Т.В., Иваницкая Е.Ю. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма у первоклассников с проявлениями СДВГ // *Вестник Поморского университета. Серия Физиологические и психолого-педагогические науки*. 2005. № 2 (8). С. 41–49.

20. Шлык Н.И. Сердечный ритм и тип регуляции у детей, подростков и спортсменов: монография. Ижевск: Удмуртский университет, 2009. 259 с.

21. Догадкина С.Б., Ермакова И.В., Адамовская О.Н., Кмит Г.В., Рублева Л.В., Шарапов А.Н. Вариабельность сердечного ритма и уровень кортизола у детей школьного возраста при разной когнитивной нагрузке // *Acta Biomedica Scientifica*. 2022. Т. 7. № 3. С. 169–179. doi: 10.29413/ABS.2022-7.3.18

22. Blons E., Arsac L.M., Gilfriche P., McLeod H., Lespinet-Najib V., Grivel E., Deschodt-Arsac V. Alterations in heart-brain interactions under mild stress during a cognitive task are reflected in entropy of heart rate dynamics // *Sci. Rep.* 2019. No. 9. Article No. 18190. doi: 10.1038/s41598-019-54547-7

23. Сабанчиева Л.А. Зависимость адаптационных возможностей организма от соматотипа ребенка // *Вестник КБГУ. Сер. Мед. науки*. 2006. № 9. С. 102–103.

24. Ивановский Ю.А. Радиационный гормезис. Благоприятны ли малые дозы ионизирующей радиации? // *Вестник ДВО РАН*, 2006. № 6. С. 86–91.

25. Медведев В.И. Устойчивость физиологических и психологических функций человека при действии экстремальных факторов. Л.: Наука, 1982. 103 с.

2. Lerman A., Zeiher A. M. Endothelial function: cardiac events // *Circulation*. 2005. V. 111. No. 3. P. 363–368. doi: 10.1161/01.CIR.0000153339.27064.14

3. Lipunova A.S., Boldueva S.A., Leonova I.A., Kolesnichenko M.G., Ryzhkova D.V., Kecherukova A.B., Manasyan A.G., Feoktistova V.S., Petrova V.B., Zakharova O.V. The role of dysfunction of endothelium in genesis of cardiac X syndrome // *Preventive and clinical medicine*. 2013. No. 1. P. 38–42 (in Russian).

4. Kalabin O.V., Litvin F.B., Brook T.M., Bykova I.V., Udoenko E.V. Influence of radioecological pollution on heart rate variability in young men of different somatotypes // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 232–237. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-232-239

5. Korsakov A.V., Domakhina A.S., Troshin V.P., Geger E.V. Child and adult morbidity in the Bryansk region by the level of radioactive, chemical and combined contamination: an ecological study // *Human Ecology*. 2020. No. 7. P. 4–14 (in Russian). doi: 10.33396/1728-0869-2020-7-4-14

6. Litvin F.B., Brook T.M., Terekhov P.A., Bykova I.V. Dynamics of heart rate variability during the school year in boys 8–9 years of age from different radioecological places of residence // *Physical Culture and Health*. 2019. V. 71. No. 4. P. 152–154 (in Russian).

7. Averyanova I.V., Maksimov A.L. Cardiovascular system indexes and heart rate in magadan young male residents with different body constitution types // *Bulletin of the Mordovian University*. 2017. V. 27. No. 3. P. 397–409 (in Russian). doi: 10.15507/0236-2910.027.201703.397-409

8. New methods of electrocardiography / Eds. S.V. Grachev, G.G. Ivanov, A.L. Syrkin. Moskva: Technosphere, 2007. 552 p. (in Russian).

9. Yablokov A.V., Nesterenko V.B., Nesterenko A.V., Preobrazhenskaya N.E. Chernobyl: consequences of the Catastrophe for man and nature. Moskva: KMK, 2016. 826 p. (in Russian).

10. Atlas of modern and forecast aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected territories of Russia and Belarus / Eds. Yu.A. Israel, I.M. Bogdevich. Moskva: Fond “Infosfera – NIA – Priroda”; Minsk: Belkartografiya, 2009. 140 p. (in Russian).

11. Cities and districts of the Bryansk region: statistical collection. Bryansk: IITs Bryanskstata, 2022. 255 p. (in Russian).

12. Data on radioactive contamination of the territory of populated areas of the Russian Federation with cesium-137, strontium-90 and plutonium-239+240 / Ed. V.N. Yakhryushin. Obninsk: FGBU “NPO Tayfun”, 2023. 228 p. (in Russian).

13. Trapeznikova L.N. Radiation doses of the population of the Bryansk region from various sources of ionizing radiation for 2020 (information directory). Bryansk: Directorate of the Federal Service for Supervision of Consumer

References

1. Kostriukova N.K., Karpin V.A. Biological effects of low-dose ionizing radiation // *Siberian Medical Journal*. 2005. V. 50. No. 1. P. 17–22 (in Russian).

Rights Protection and Human Welfare in the Bryansk Region, 2021. 51 p. (in Russian).

14. Romanovich I.K., Bruk G.Ya., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Yakovlev V.A. The dynamics of average annual and cumulative radiation exposure doses of the adult population of the Russian Federation after the Chernobyl disaster // *Public Health and Life Environment*. 2020. No. 3. P. 33–38 (in Russian). doi: 10.35627/2219-5238/2020-324-3-33-38

15. Korsakov A.V., Geger E.V., Lagerev D.G., Pugach L.I., Mousseau T.A. *De novo* congenital malformation frequencies in children from the Bryansk region following the Chernobyl disaster (2000–2017) // *Heliyon*. 2020. V. 6. No. 8. Article No. e04616. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04616

16. Korsakov A.V., Kryukova A.E., Troshin V.P., Milushkina O.Yu., Lagerev D.G. Primary incidence of cervical cancer in the population living in ecologically disadvantaged areas (2000–2020) // *Hygiene and Sanitation*. 2023. V. 102. No. 1. P. 14–21 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-14-21

17. Korenev N.M., Borisko G.A., Kashina-Yarmak V.L. Health status of children, born in families of parents which were irradiated due to Chernobyl NPP accident // *Child's Health*. 2012. No. 6. P. 66–70 (in Russian).

18. Volokitina T.V., Gribanov A.V. Heart rate variability in children of primary school age: monograph. Arkhangelsk: Pomor University, 2004. 194 p. (in Russian).

19. Volokitina T.V., Ivanitskaya E.Yu. Spectral analysis of heart rate variability in first-graders with manifesta-

tions of ADHD // *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya Fiziologicheskie i psikhologo-pedagogicheskie nauki*. 2005. No. 2 (8). P. 41–49 (in Russian).

20. Shlyk N.I. The heart rate and regulation type of children, teenagers and sportsmen. Izhevsk: Udmurt University, 2009. 259 p. (in Russian).

21. Dogadkina S.B., Ermakova I.V., Adamovskaya O.N., Kmit G.V., Rubleva L.V., Sharapov A.N. Heart rate variability and cortisol levels in school-age children under different cognitive tests // *Acta Biomedica Scientifica*. 2022. V. 7. No. 3. P. 169–179. doi: 10.29413/ABS.2022-7.3.18

22. Blons E., Arsac L.M., Gilfriche P., McLeod H., Lespinet-Najib V., Grivel E., Deschodt-Arsac V. Alterations in heart-brain interactions under mild stress during a cognitive task are reflected in entropy of heart rate dynamics // *Sci. Rep.* 2019. No. 9. Article No. 18190. doi: 10.1038/s41598-019-54547-7

23. Sabanchieva L.A. Dependence of the body's adaptive capabilities on the child's somatotype // *Vestnik KBGU. Seriya Meditsinskie nauki*. 2006. No. 9. P. 102–103 (in Russian).

24. Ivanovsky Yu.A. Radiation hormesis. Is low-dose ionizing radiation favorable? // *Vestnik of the FEB RAS*. 2006. No. 6. P. 86–91 (in Russian).

25. Medvedev V.I. Stability of physiological and psychological functions of a person under the influence of extreme factors. Leningrad: Nauka, 1982. 103 p. (in Russian).

Педагогическая династия – гордость системы образования

© 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: usr08619@vyatsu.ru

The pedagogical dynasty is the pride of the education system

© 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 Center of the

Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: usr08619@vyatsu.ru

Доктор биологических наук, профессор Любовь Владимировна Кондакова родилась в семье служащего, участника Великой Отечественной войны и учителя начальных классов. С детства Любовь Владимировна видела преданный своей профессии труд педагога, видела как к её маме относятся родители, как уважают и любят её ученики. После окончания школы **Любовь Владимировна** поступила в Советское педагогическое училище, а в 1968 г. – в Кировский государственный педагогический институт им. В.И. Ленина на естественно-географический факультет. После окончания института в 1973 г. по программе педагогического распределения она была направлена для работы учителем химии в Кугушергскую среднюю школу Яранского района. Здесь она встретила своего будущего мужа, также выпускника педагогического института, **учителя физики Александра Николаевича Кондакова**.

В 1976 г. Любовь Владимировна Кондакова была приглашена на работу в должности ассистента кафедры ботаники Кировского государственного педагогического института. Педагогическую деятельность семьи Кондаковых продолжила дочь Ирина Александровна, которая после окончания школы поступила в тот же институт, где учились её родители, только на специальность учитель английского и немецкого языка, а после окончания университета и аспирантуры Ирина Александровна

работает доцентом на кафедре лингвистики и перевода данного университета. Также педагогическую династию семьи Кондаковых составляют и Софья Савельевна Кондакова, мама Александра Николаевича, и его сестра Валентина Николаевна, сестра Любовь Владимировны – Галина Владимировна. Общий педагогический стаж их учительской династии составляет на сегодня более 250 лет.

В становлении педагогической и научной деятельности Л.В. Кондаковой судьбоносной стала встреча с ведущим альгологом мира, доктором биологических наук, профессором, заслуженным деятелем науки РФ Эмилией Адриановной Штиной, которая определила дальнейшую научную судьбу молодого педагога Л.В. Кондаковой. В 1978 г. она поступила в аспирантуру на кафедру ботаники Кировского сельскохозяйственного института и начала работать по теме диссертации «Изменение сообществ почвенных водорослей при мелиорации дерново-подзолистых почв». Успешно завершив аспирантуру и защитив кандидатскую диссертацию, она продолжила работу в Кировском государственном педагогическом университете, где главными доминирующими направлениями её деятельности стали педагогическая работа и научные исследования. В университете Любовь Владимировна создавала и возглавляла две кафедры, вначале в 1982 г. кафедру методики начального обучения на факультете начальных классов, а затем



в 1998 г. кафедру экологии на естественно-географическом факультете. Участвовала в создании химического факультета и с 2000 по 2005 гг. была его деканом. Она читает курсы по дисциплинам: «Общая экология», «Экология популяций и сообществ», «Современные проблемы экологии и природопользования», «Экология», «Устойчивое развитие». Учебно-методическую работу проводит на высоком научно-методическом и теоретическом уровне. В 1989 г. Л.В. Кондаковой присвоено звание доцента. Одновременно она активно занималась научными исследованиями, продолжая определять и изучать почвенные водоросли, цианобактерии, создавая летопись альгофлоры почв Кировской области. Результаты научных исследований стали основой для написания докторской диссертации, монографий, а также нашли широкое практическое применение в оценке состояния окружающей среды и оценке техногенного воздействия на экосистемы. В 2012 г. Л.В. Кондакова защитила диссертацию по теме «Альго-цианобактериальная флора и особенности её развития в антропогенно нарушенных почвах (на примере почв подзоны южной тайги Европейской части России)» на соискание учёной степени доктора биологических наук. Она является автором и соавтором около 400 печатных работ, в числе которых несколько монографий («Флора Вятского края»,

«Леса Кировской области», «Биологический мониторинг природно-техногенных систем» и другие), учебно-методических пособий. Опыт научного исследователя, профессионала флориста, навыки работы, выделения и определения почвенных водорослей и цианобактерий она с любовью передаёт своим студентам, магистрантам, выпускникам университета, являясь научным руководителем выпускных работ, магистерских и аспирантских диссертаций.

За период работы Л.В. Кондакова неоднократно награждалась грамотами университета, в 1994 г. ей вручён значок «Отличник народного просвещения», в 2002 г. присвоено звание «Почётный работник высшей школы». В составе коллектива лаборатории биомониторинга ВятГГУ и Института биологии Коми НЦ УрО РАН была дважды лауреатом премии Правительства Кировской области в области экологического образования и экологии окружающей среды. В 2009 г. присвоено звание Почётный работник ВятГГУ. В 2014 г. она награждена Почётной грамотой правительства Кировской области, а в 2016 г. Кондаковой Л.В. присвоено звание профессора.

Л.В. Кондакова является членом УМО по классическому университетскому образованию по экологии и устойчивому развитию МГУ, членом Координационного методического совета по экологии при Министерстве охраны окружающей среды Кировской области, членом редколлегии научного журнала «Теоретическая и прикладная экология». Она верный и надёжный друг, пример для подражания. Быть педагогом – это призвание и судьба! Любовь Владимировну отличает преданность к выбранному делу, любовь к учительскому и педагогическому труду, которому она посвятила 50 лет своей трудовой деятельности.

Л. В. Кондакова пользуется заслуженным уважением и авторитетом среди преподавателей, научных сотрудников и студентов.

Коллектив лаборатории биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГГУ, кафедры экологии и природопользования Вятского государственного университета, редколлегии журнала «Теоретическая и прикладная экология» поздравляют Любовь Владимировну с юбилеем, выражают свою сердечную благодарность и искреннюю признательность за добросовестный труд и сотрудничество, желают доброго здоровья, дальнейших достижений в научной и педагогической деятельности, новых открытий в изучении альгофлоры Вятского края.

Конкурс как средство формирования креативного потенциала личности

© 2024. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с.,

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

Competition as a means of developing the creative potential of an individual

© 2024. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760^{*}

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

Важнейшей задачей современного образования является формирование творческого потенциала обучающихся. Выявление и поддержка одарённой молодёжи, способной активно включаться в решение разнообразных проблем, обеспечивает основу прогресса государства. Раскрытию креативных возможностей молодёжи способствуют разнообразные конкурсы. Положительный опыт, приобретённый в период подготовки и участия в соответствующих мероприятиях, позволяет сформировать новые компетенции, необходимые для достижения поставленных целей, поиска нестандартных и перспективных решений тех или иных задач, интеграции юных исследователей в социальную систему. Реализация инновационного пути развития России невозможна без подготовки молодых специалистов, способных творчески мыслить, успешно конкурировать, просчитывать возможные риски, воплощать свои идеи в практику. Организация и проведение молодёжных конкурсов является важным направлением образовательной деятельности вузов.

Хорошая традиция проведения молодёжных конкурсов сложилась в Вятском государственном университете (ВятГУ). На протяжении многих лет в этом вузе еже-

годные молодёжные конкурсы проводятся в рамках научно-практической конференции «Экология родного края: проблемы и пути их решения» и форума «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии». Участие в конкурсах принимают молодые учёные, аспиранты, студенты вузов и колледжей, учащиеся средних общеобразовательных школ, гимназий, лицеев. 23 апреля 2024 г. в рамках Стратегии развития университета и международной конференции «Экология родного края: проблемы и пути их решения» состоялся заключительный этап регионального молодёжного конкурса научно-исследовательских, проектных и творческих работ «Мой любимый город», посвящённого 650-летию г. Кирова (см. цв. вкладку V). Конкурс проводился ВятГУ при поддержке Администрации г. Кирова, Западно-Уральского межрегионального управления Росприроднадзора по Кировской области, Министерства охраны окружающей среды Кировской области, Министерства лесного хозяйства Кировской области, Министерства культуры Кировской области, Министерства образования Кировской области, Министерства спорта и молодёжной политики, Общественной палаты Кировской

области, Вятской торгово-промышленной палаты, ПАО «Сбербанк России», КЧХК «ЗМУ «УРАЛХИМ», АО «Агрофирма «Дороники».

Основная цель конкурса – привлечение молодёжи к научно-исследовательской, проектной и творческой деятельности в области обеспечения комфортной городской среды, повышения социально-экономического потенциала и развития культуры г. Кирова; поддержка инновационных идей; обеспечение информационного пространства для творческой и интеллектуальной самореализации конкурсантов.

Всего на конкурс было представлено 64 работы. Все работы были рассмотрены на первом (заочном) этапе. К участию в очном этапе было допущено 33 работы в 7 номинациях: «Архитектура и благоустройство городской среды»; «Культура и творчество»; «Наука и новые технологии»; «Сельское хозяйство и органическое земледелие»; «Здравоохранение и спорт»; «Производство товаров и услуг»; «Охрана окружающей среды и рациональное природопользование».

Больше всего работ поступило от студентов вузов (57%) и учащихся школ (27%). Самыми юными участниками конкурса стали учащиеся 3-го класса гимназии № 1 г. Кирово-Чепецка Кировской области, которые представили работу на тему «Театральная кукла в дымковском стиле» (руководитель Н.Г. Мурина). В работе юных гимназисток удалось объединить знания и представления о куклах Бибабо, народном промысле Вятского края – дымковской игрушке, традициях и обычаях вятчан.

В номинации «Архитектура и благоустройство городской среды» были представлены работы выпускников факультета технологий, инжиниринга и дизайна ВятГУ, выполненные под руководством старшего преподавателя кафедры дизайна и изобразительного искусства, члена Союза Художников России Д.В. Патрушева. Работы были посвящены благоустройству культурно значимых территорий г. Кирова (Сквер художников, дом Витберга, сквер «Родина», сквер Алые Паруса, Музыкальный сквер, Никитский сквер). Работы отличались высоким профессионализмом, детальной проработкой отдельных художественных элементов, грамотным композиционным решением, обоснованностью планировки, наличием экономических расчётов и смет. Воплощение соответствующих проектов в жизнь могло бы существенно украсить облик г. Кирова.

Полезные работы в сфере экологии были выполнены под руководством заведующей

кафедрой промышленной и прикладной экологии ВятГУ Т.А. Мусихиной. Например, работа О.А. Легостаевой «Систематизация экологических требований к хозяйственной деятельности. Нормативно-правовой аспект» была запрошена экологическими службами некоторых крупных сельскохозяйственных предприятий города для практического использования.

Живой интерес вызвали работы, выполненные под руководством Л.В. Морилловой: «Разработка модели сумки-переноски для животных по технологии апсайклинг» (автор К.Г. Саргсян) и «Разработка модели вязаной одежды с отделкой вязаными цветами по мотивам цветущих растений Красной книги Кировской области» (автор В.Р. Старкова).

Интересные разработки в области медицинской и фармацевтической химии были представлены на конкурс студентами института химии и экологии ВятГУ: «Пластыри для лечения трофических язв», «Биологически активные добавки к пище в виде леденцовой карамели» и др.

Студент 4 курса Вятского ГАТУ И.Р. Овечкин представил на конкурс работу на тему: «Служебные собаки как источник зооноза для человека». Результаты исследований этого автора заставляют задуматься о необходимости профилактики такого опасного для человека зоонозного заболевания, как диروفилляриоз, вектором передачи которого являются кровососущие насекомые, широко распространённые на территории области.

Большой интерес вызвала работа А.В. Вишнякова и П.И. Плетенёвой (Кировский ГМУ), посвящённая пропаганде здорового образа жизни и антинаркотических ценностей через обучающие профилактические мероприятия.

В номинации «Культура и творчество» была представлена яркая работа студентов Кировского педагогического колледжа «Технология создания музыкального спектакля «Новогодний экспресс-тур».

Высокую оценку жюри получил анимационный фильм «Солнечная система», созданный м.н.с. НИЛ биомониторинга ВятГУ В.В. Рутманом и аспирантом М. Хето.

Следует отметить высокий научный уровень и практическую значимость конкурсных работ учащихся средних школ, выполненных под руководством преподавателей ВятГУ. Например, работа С.А. Кропачевой «Применение отходов серы для мелиорации щелочных засоленных почв» (руководитель с.н. с. НИЛ биомониторинга ВятГУ

Т.И. Кутявина) была выполнена в рамках научно-исследовательской работы для Республики Казахстан. Работа была заслуженно награждена дипломом 1 степени, что подтверждает целесообразность тесного взаимодействия школ и вузов в формировании научных компетенций молодёжи.

Очень важно, чтобы первые шаги в науке были успешными, поэтому основу работы жюри составили не столько принципы соревнования и конкуренции, сколько принципы поддержки конкурсантов, искренней заин-

тересованности в полученных результатах, стимулирование стремления к продолжению дальнейшей работы в выбранной области. Каждый участник конкурса был награждён дипломом и ценным подарком.

Итоги конкурса показали высокую эффективность и практическую значимость соответствующего мероприятия в плане самореализации молодёжи, вовлечения её в социальную практику, научную и творческую деятельность, развитие гражданской активности, стремления внести свой вклад в развитие страны.

Экология родного края: проблемы и пути их решения

© 2024. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
М. Л. Сазанова^{1,2}, к. б. н., доцент, н. с.,
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

Ecology of the native land: problems and solutions

© 2024. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
M. L. Sazanova^{1,2} ORCID: 0000-0003-3492-8395
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

23–24 апреля 2024 г. в городе Кирове на базе Вятского государственного университета в сотрудничестве с Институтом биологии Коми НЦ УрО РАН, Ляонинским институтом науки и технологии (Бэньси, провинция Ляонин, Китайская Народная Республика), Министерством охраны окружающей среды, Общественной Палатой Кировской области и Вятской торгово-промышленной Палатой; при поддержке филиала «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ», Кировского отделения № 8612 ПАО Сбербанк России, Регионального оператора АО «Куприт» проведена между-

народная научная конференция «Экология родного края: проблемы и пути их решения» (см. цв. вкладку VI). Конференция с такой темой проводится в университете в 19 раз, но в этом году статус её изменился и она объявлена международной, в связи с участием учёных из Китая, Индии, Мексики, Белоруссии, Казахстана, Узбекистана (56 участников). Значительно расширилась география городов нашей страны до 27, из которых пришли заявки на конференцию от участников 89 научных организаций. Всего в международной научной конференции приняло участие более 400 человек.

Программа международной научной конференции «Экология родного края: проблемы и пути их решения» была посвящена Десятилетию науки и технологий, 300-летию Российской Академии наук, 80-летию ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и 650-летию города Кирова.

Перед началом работы конференции гости могли ознакомиться с художественными работами Д.В. Патрушева на организованной в холле Инженериума ВятГУ передвижной вариативной выставке «Вятка. Город впечатления. Версия 2», посвящённой 650-летию города Кирова.

Конференцию открыл и поприветствовал её участников проректор по науке и инновациям ВятГУ С.Г. Литвинец. С приветствием к участникам конференции выступили глава города Кирова Е.В. Ковалёва, директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН И.Ф. Чадин, директор отдела развития сотрудничества и международного образования Ляонинского института науки и технологий, Китайская Народная Республика, министр охраны окружающей среды Кировской области Т.Э. Абашев, проректор по международной деятельности ВятГУ С.В. Фомин, председатель Общественной Палаты Кировской области С.Н. Улитин, вице-президент Союза «Вятская торгово-промышленная Палата» Л.И. Перминов, заместитель управляющего Кировским отделением ПАО «Сбербанк» России В.В. Пикулев, Генеральный директор АО «Куприт» И.М. Гизатуллин, которые отметили особую важность и актуальность обсуждаемой тематики на данной научной конференции.

Поскольку научная конференция проходила в предюбилейные дни города Кирова, то пленарное заседание было открыто докладом профессора Т.Я. Ашихминой – «Городу Кирову 650 лет». В докладе были отражены основные этапы исторического развития города в дореволюционный период, становление различных отраслей производства в годы войны и мирное время, особое внимание обращено на архитектурное, парковое строительство в городской среде, развитие учреждений образования, науки, культуры в регионе и какими успехами встречает город свой юбилей.

С глубоким аналитическим докладом «Аграрная наука Вятского края – вклад в решение современных вызовов» выступил на пленарном заседании директор Федерального аграрного-научного центра (ФАНЦ) Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого канд. с.-х. наук И.А. Устюжанин. В докладе была отражена заслуга учёных ФАНЦ в развитии селекционной

деятельности в семеноводстве, создании новых урожайных сортов, адаптированных к условиям Северного земледелия: дефициту в почве элементов питания, повышенной кислотности почвы и токсичности алюминия; проведён анализ урожайности таких сельскохозяйственных культур в регионе с 1900 по 2022 гг., как рожь и ячмень, урожайность которых за этот период возросла с 8 до 28 ц/га, т. е. в 3 раза, урожайность картофеля с 59 до 218 ц/га, т. е. в 4 раза. В то же время посевные площади этих культур значительно снизились, например, озимой ржи с 8 млн 808 тыс. га в 1990 г. до 834 тыс. га в 2023 г., т. е. сократились в 10 раз.

По материалам трёхлетних исследований (2021–2023 гг.) атмосферного воздуха в городе Кирове с докладом выступила Л.Г. Мальцева, начальник отдела санитарного надзора управления Роспотребнадзора по Кировской области. В презентации по докладу были отмечены локальные участки максимального загрязнения, выявлены 13 приоритетных запахов образующих загрязняющих веществ (метанол, аммиак, этанол, фурфурол, этановая кислота, диметилсульфид, формальдегид, алканы C-12-19, этилформиат, сероводород и др.) и, что самое главное, определены источники загрязнения.

С докладом «Вехи развития пчеловодства» выступила доктор с.-х. наук, зав. отделом пчеловодства ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого А. З. Брандорф, которая отметила, что в Вятском крае пчеловодство начало развиваться с 1860 г. Активно этим занимался М.А. Дернов, работающий директором НИИ Северо-Востока (1907–1912 гг.). По его инициативе был организован пчеловодный музей; издавались журналы «Пчеловодная жизнь», «Пчеловод», «Вятское пчеловодство». Он являлся автором 16 книг, а книга «Главные пасечные работы» переведена на 5 языков. В Вятке была проведена первая конкурсная губернская пчеловодная выставка, а также второй и третий съезд пчеловодов Вятской губернии. В заключение А.З. Брандорф отметила, что вятский мёд не уступает по качеству мёду из других регионов и особенно ценится своими вкусовыми качествами.

С большим интересом были заслушаны доклады Е.М. Лаптевой канд. биол. наук, доцента, руководителя группы почв отдела почвоведения Института биологии Коми НЦ УрО РАН – «Почвы ООПТ как основа долговременного мониторинга пулов и потоков углерода»; А.И. Сафонова канд. биол. наук, доцента, зав. кафедрой ботаники и экологии Донецкого государственного университета –

«Потенциальные нео-очаги генотоксичности природных сред в Донбассе»; Т.Л. Егошиной доктора биол. наук, профессора, зав. отделом экологии и ресурсоедения растений Всероссийского научно-исследовательского института охотничьего хозяйства и звероводства им. профессора Б.М. Житкова – «Биологические ресурсы Кировской области»; А.А. Широких доктора биол. наук, в. н. с. лаборатории биотехнологии растений и микроорганизмов ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого – «Аэробные метилбактерии как компоненты микробно-растительных симбиозов»; Ю.М. Земцовой ведущего исследователя данных Центра развития технологий AI во благо общества Департамента развития искусственного интеллекта и машинного обучения Сбербанка – «Детекция и идентификация животных с помощью искусственного интеллекта»; Т.В. Дрозденко канд. биол. наук, доцента кафедры экологии и экспериментальной биологии Псковского государственного университета – «Фитопланктон в оценке экологического состояния Псковского озера»; С.Б. Ярусовой канд. хим. наук, доцента, с. н. с. Института химии ДВО РАН – «Некоторые аспекты оценки уровня экологической компетентности учащихся».

Наряду с отечественными учёными на пленарном заседании выступили учёные из Китая и Индии. С докладами из Ляонинского института науки и технологий, Беньси, Китайская Народная Республика выступили: доктор наук Ань Чанвэй с докладом о качестве воды и контроле функционирования очистных сооружений, доктор наук Сяохуэй Ли рассказал об определении следов цианида в воде методом полярографии, доктор наук Лю Даньдан осветил вопросы создания и доставки лекарств для лечения рака толстой кишки с использованием химио-фототермической синергетической терапии. Из университета доктора К. В. Рамана в Кхандве (Республика Индия) с докладами выступили Сандеш Кумар Дафтари, рассказавший об инновациях в области борьбы с вредителями для устойчивого сельского хозяйства в Индии и доцент Сима

Шарма с докладом об изменениях в социокультурном ландшафте Индии в 2024 г.

Всего с пленарными докладами на конференции выступило 18 участников. Кроме пленарного заседания, на конференции работало 9 тематических секций: Экологические проблемы регионов, пути решения; Экологический мониторинг состояния окружающей среды; Цифровизация: новые информационные технологии; Рациональное использование природных ресурсов: научные исследования и разработки; Химия и экология почв; Экология микроорганизмов; Биология и экология растений и животных; Экологическое образование и воспитание. Социальная экология, в процессе работы которых было заслушано 46 докладов, из них 18 онлайн. На данных секциях с докладами приняло участие большое количество иностранных учёных: из Китая – выступило с докладами 15 учёных, из Белоруссии – 11, Индии – 4, Узбекистана – 4, Казахстана – 3, Мексики – 1.

Основная цель проведения международной научной конференции достигнута. В ходе научно-практической конференции был рассмотрен широкий круг теоретических, методических и организационных вопросов в области охраны окружающей природной среды. В конференции приняли активное участие аспиранты и молодые учёные. Участники конференции отметили важность и значимость обозначенных проблем и тенденций в области сохранения биоразнообразия, организации экологического мониторинга различных экосистем, необходимости разработки новых экспресс-методов оценки окружающей среды, активного применения цифровых технологий и методов геномного анализа в научных исследованиях; выразили уверенность, что рекомендации, выработанные по результатам работы конференции, будут содействовать дальнейшему развитию научных исследований по изучению и сохранению экологии родного края.

По итогам работы конференции опубликованы материалы в сборниках и размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>.

**Региональный молодёжный конкурс научно-исследовательских, проектных и творческих работ «Мой любимый город», посвящённый 650-летию г. Кирова
г. Киров, 23 апреля 2024 г.**



**Международная научно-практическая конференция
«ЭКОЛОГИЯ РОДНОГО КРАЯ: проблемы и пути их решения»
г. Киров, 23–24 апреля 2024 г.**





Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004