



2022

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 3

Theoretical and
Applied Ecology



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

АГРОЭКОЛОГИЯ

РЕМЕДИАЦИЯ И
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



«УРАЛХИМ» – ОДИН ИЗ ФЛАГМАНОВ КИРОВСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Одно из крупнейших предприятий Кировской области – Кирово-Чепецкий филиал компании «Уралхим» – производит минеральные удобрения и обладает широкой ассортиментной линейкой. Завод располагает высоким научно-техническим и инженерным потенциалом, его продукция широко известна не только в России, но и за рубежом.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ОТКРЫТОСТЬ

Наряду с высокими производственными показателями, Кирово-Чепецкий филиал компании «Уралхим», как социально ответственный бизнес, ведёт масштабную работу, направленную на сохранение и укрепление экологической безопасности. Информационная открытость – главный принцип работы предприятия, это касается и экологической тематики. Экологический отчёт, который выпускается уже более 10 лет, – ежегодно презентуется представителям общественных организаций, органов власти и управления, преподавателям и студентам, сотрудникам библиотек, ветеранам города и др. В отчёте подводятся итоги и определяются основные мероприятия и направления природоохранной деятельности.

СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Компания «Уралхим», как социально направленное предприятие, продолжает активную работу в реализации важных социальных программ. Ежегодно руководством Кировской области и г. Кирово-Чепецка подписываются соглашения о сотрудничестве в области социальной политики. Основная их цель – взаимодействие в сфере реализации программ и мероприятий, имеющих особое значение для жителей области. Они способствуют решению целого ряда социально значимых вопросов: социальной защите и занятости жителей г. Кирово-Чепецка и области, развитию транспортной инфраструктуры, образования, охраны окружающей среды и природопользования, развитию сферы культуры, государственной молодёжной политики, физической культуры и массового спорта. Стоит отметить, что «Уралхим» ответственно относится к развитию г. Кирово-Чепецка, где расположено предприятие. Кроме того, практика социального партнёрства на протяжении многих лет распространяется на девять муниципальных районов, интересы жителей которых в Законодательном собрании Кировской области представляют депутаты – сотрудники компании.

РЫНКИ СБЫТА И СЕРВИСЫ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Приоритетным для «Уралхим» всегда был и остаётся внутренний рынок. Особенно сейчас. Российские сельхозпроизводители – главные стратегические партнёры. Компания уделяет особое внимание запросам отечественных аграриев и развивает максимально удобную для них систему дистрибуции. Понимая всю социальную ответственность, на сегодняшний день «Уралхим» большую часть своих продуктов поставляет на внутренний рынок.

Помимо продаж удобрений, «Уралхим» напрямую работает с клиентами – предоставляет сервисы и программы для повышения эффективности их бизнеса. Сегодня это образовательные программы (агроконсультирование и агропроектирование, которые проводятся практически во всех регионах РФ), услуги агролаборатории, разработка систем питания растений и многое другое. С этой целью в августе 2022 г. «Уралхим» провёл третье ежегодное аграрное мероприятие «День поля» в Кировской области. Мероприятие направлено на повышение уровня осведомлённости клиентов, а также демонстрацию применения удобрений и сервисов компании в реальных условиях. «Уралхим» работает в тесной кооперации с Минпромторгом, Минсельхозом и Мин-экономразвития РФ по обеспечению российских аграриев минеральными удобрениями.

НА ВЫСШЕМ УРОВНЕ

Успехи и достижения компании отмечены не только руководством региона, но и страны. В январе 2022 г. в Кремле прошла рабочая встреча Президента РФ Владимира Путина с председателем совета директоров Объединённой химической компании «Уралхим» Дмитрием Мазепиным, а в августе о компании «Уралхим» с Президентом говорил уже глава Кировской области Александр Соколов. По его словам, «Уралхим» – это флагманское предприятие региона, один из его крупнейших налогоплательщиков, а также градообразующее для г. Кирово-Чепецка, оно впечатляет объёмами, технологиями.



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 3, 2022
<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 (№ 2299 по состоянию на 20.07.2022).

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., старший 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 С.Г. Скугорева, 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, фотографии на 1-й и 4-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: 26.09.2022. Тираж: 250 экз. Заказ № 7822. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография» Адрес типографии: 610017, Кировская область, г. Киров, ул. Анфисы Горбуновой, 23

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Т.К. Головки 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)
Г.М. Зенова д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Г.Я. Кантор к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
В.Л. Коваленко к.т.н., доцент, доцент Украинского государственного химико-технологического университета
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. Лаженцев д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
В.З. Латыпова д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор, профессор Казанского федерального университета д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилинского аграрного университета
Ли Юй к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
С.Г. Литвинцев д.т.н., профессор, профессор Московского государственного университета геодезии и картографии д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
В.А. Малинников д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
А.А. Москалёв к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
С.А. Рубцова д.х.н., старший научный сотрудник, директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
В.П. Савиных д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
Ф. Скапини д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
В.А. Сысуев д.б.н., доцент, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
В.А. Терехова д.б.н., доцент, профессор Саратовского государственного технического университета д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Е.И. Тихомирова д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного университета д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Т.А. Трифонова д.б.н., профессор, профессор Познаньского университета наук о жизни (Польша)
Б.Н. Хойницки д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ» д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
В.И. Холстов д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета
М.Х. Хусейн
В.Т. Юнгблюд



*Theoretical
and Applied
ECOLOGY*
No. 3, 2022

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, Senior 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 S.G. Skugoreva,

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 PC248 in the joint catalog "Press of Russia".

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. Photos on the 1st and 4th cover – Alexander Shirokikh. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva. Director of the publishing house "O-Kratkoe" Evgeniy Drogov. © Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: September 26, 2022. Circulation 250 copies. Order No. 7822. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD
Printing Address: 23, Anfisy Gorbunovoy St., Kirov, Russia, 610017

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

- A.M. Askhabov** Doctor in Geology and Mineralogy, Academician of RAS, Professor, Scientific Director of FRC Komi SC UB RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- 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
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- 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
- AA. 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"
- B.H. Chojnicki** Doctor in Biology, Professor of Poznan University of Life Sciences (Poland)
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of University of Assiut University (Egypt)
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- Т. К. Шешегова, Л. М. Шежлеина* Фитопатогенная биота в условиях потепления климата (обзор)6
- Л. И. Домрачева, С. Г. Скугорева, А. Л. Ковина, А. И. Коротких, П. А. Стариков, Т. Я. Ашихмина* Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор)14

СТАТЬИ

- В. А. Белый, И. М. Кузванов, И. В. Федорова, Е. У. Ипатов, И. Ю. Чукичева, А. В. Кучин* Оценка фотопротекторного действия терпенофенолов при защите полилактида от УФ-С излучения26
- А. И. Фокина, Е. Г. Фоминых, К. И. Южанин* Электрохимические методы определения аскорбиновой кислоты в биологически активных добавках34
- Е. В. Кошелева, Л. А. Калинина, Ю. Н. Ушакова, Б. А. Ананченко* Сравнительная оценка перспективности использования серопроводящих твёрдых электролитов в составе датчиков на сероводород и диоксид серы41

- S. V. Degteva, Yu. A. Dubrovskiy, M. V. Dulin, G. V. Zheleznova, V. A. Kanev, D. V. Kirillov, D. A. Kosolapov, D. I. Kudreavtzeva, M. A. Palamarchuk, T. N. Pystina, N. A. Semenova, T. P. Shubina* Rare species of plants and fungi in the “Koigorodskiy” National Park (Komi Republic, Russia)49
- S. Llerena, G. Toasa, A. I. Kurbatova* NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador58
- Л. В. Черная, Л. А. Ковальчук, Н. В. Микшевич* Особенности биоаккумуляции тяжёлых металлов в тканях большой ложноконской пиявки *Haemopsis sanguisuga* L. в водных экосистемах Урала68
- Н. Н. Камардин, С. В. Холодкевич, В. М. Макеева* Мониторинг парков прибрежной зоны Невской губы с помощью моллюска *Arianta arbustorum* ...75
- Е. А. Домнина, Т. А. Адамович, А. С. Тимонов, Т. Я. Ашихмина* Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения82

- В. И. Полетаева, М. В. Пастухов* Техногенное воздействие сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары90
- А. Н. Эйрих, Т. Г. Серых, Е. А. Овчаренко, Д. П. Подчуфарова, А. В. Котовицков* Сезонная динамика химического состава поверхностной воды р. Оби96
- Т. И. Кутявина, И. А. Варган, Е. В. Шемякина, В. В. Тимина* Гидрохимические условия формирования водно-болотных экосистем государственного природного заказника «Былина»103
- Е. А. Горностаева, Г. И. Березин, Е. В. Дабах* Тяжёлые металлы в снежном покрове и городских почвах110

- Е. В. Федосеева, А. П. Кирюшина, Д. И. Стом, В. А. Терехова* Устойчивость почвенных микромицетов *Trichoderma viride* и *Alternaria alternata* к тяжёлым металлам Cu и Pb118

- Н. П. Хрунина, А. Ю. Чебан* Снижение геохимических техногенных потоков при разработке полиминерального месторождения Дальневосточного региона128

- R. Berdja, L. Lamari, N. Bouras, M. D. Holtz* Host by strain association study of rhizospheric actinobacteria on two Algerian date palm cultivars135
- И. Д. Свистова, Н. Н. Назаренко* Экологический тренд сукцессии микобиома в чернозёме старого ботанического сада142
- И. В. Новаковская, Е. Н. Патова, Е. Г. Макеева* Снежные водоросли и цианобактерии ряда районов Урала и Западного Саяна149
- В. А. Ковалева, С. В. Денева, Ю. А. Виноградова, А. Н. Панюков, Е. М. Лаптева* Влияние ландшафтных условий на функционирование микробных сообществ постагрогенных почв тундровой зоны157

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

- Н. Ю. Егорова, В. Н. Сулейманова, Е. В. Рябова* Эколого-демографическая характеристика ценопопуляций *Cypripedium calceolus* L. в Кировской области 166
- Н. С. Корытин, В. В. Ширяев* Выживаемость и репродуктивная ценность разных когорт в популяции ондатры (*Ondatra zibethicus* L.) 175
- Е. М. Лучникова, В. Б. Ильищенко, А. В. Ковалевский, С. И. Гаишков, Л. А. Воронина, К. С. Зубко, А. В. Филиппова* Влияние различных способов лесной рекультивации на восстановление сообщества млекопитающих черневой тайги 183
- А. Я. Григорьевская, Ю. С. Горбунова, Т. А. Девятова* Фиторазнообразие как индикатор восстановления формации *Pinus sylvestris* L. Усманского бора после лесного пожара 192

АГРОЭКОЛОГИЯ

- Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, В. А. Козвонин, Е. П. Колеватых, Т. Я. Ашихмина, А. В. Сазанов* Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства 199
- Т. К. Шешегова, И. Н. Щенникова, Л. М. Щеклеина, С. А. Емелев, М. В. Черемисинов, Н. А. Жилин* Биоэкологическая и иммунологическая оценка зерна и растений *Hordeum vulgare* L. в условиях Кировской области 206
- А. В. Бакулина, Д. В. Попыванов, А. В. Харина* Изучение свойств местных изолятов фитопатогенного гриба *Parastagonospora nodorum* 212
- Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина* Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства 219

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

- С. В. Загирова, О. А. Михайлов* Сезонные изменения концентрации и нетто-обмена CO₂ в экосистеме ельника среднетаёжной подзоны 226

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

- А. В. Минкина, С. А. Двинских, Т. В. Зуева* Подход к разработке интегрального индекса экологического благополучия территории 235

ИНФОРМАЦИЯ

- VIII съезд Общества почвоведов им. В. В. Докучаева 241

CONTENTS

REVIEWS

- T. K. Sheshegova, L. M. Shchekleina* Phytopathogenic biota in the conditions of climate warming (review) 6
- L. I. Domracheva, S. G. Skugoreva, A. L. Kovina, A. I. Korotkikh, P. A. Starikov, T. Ya. Ashikhmina* Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) 14

ARTICLES

- V. A. Belyy, I. M. Kuzivanov, I. V. Fedorova, E. U. Ipatova, I. Yu. Chukicheva, A. V. Kuchin* Photoprotection properties of terpenophenols in polylactide against UVC radiation 26
- A. I. Fokina, E. G. Fominykh, K. I. Yuzhanin* Electrochemical methods for the determination of ascorbic acid in biologically active additives 34
- E. V. Kosheleva, L. A. Kalinina, Yu. N. Ushakova, B. A. Ananchenko* Comparative evaluation of the prospects of using sulfide-conducting solid electrolytes in the composition of sensors for hydrogen sulfide and sulfur dioxide 41
- S. V. Degteva, Yu. A. Dubrovskiy, M. V. Dulin, G. V. Zheleznova, V. A. Kanev, D. V. Kirillov, D. A. Kosolapov, D. I. Kudreavtzeva, M. A. Palamarchuk, T. N. Pystina, N. A. Semenova, T. P. Shubina* Rare species of plants and fungi in the "Koigorodskiy" National Park (Komi Republic, Russia) 49
- S. Llerena, G. Toasa, A. I. Kurbatova* NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador 58
- L. V. Chernaya, L. A. Kovalchuk, N. V. Mikshevich* Features of bioaccumulation of heavy metals in the tissues of the great false horse leech *Haemopsis sanguisuga* L. in aquatic ecosystems of the Urals 68
- N. N. Kamardin, S. V. Kholodkevich, V. M. Makeeva* Monitoring of parks in the coastal zone of the Neva bay with the snail *Arianta arbustorum* 75

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

E. A. Domnina, T. A. Adamovich, A. S. Timonov, T. Ya. Ashikhmina Monitoring of overgrowing of abandoned agricultural lands using high-resolution satellite images82

V. I. Poletaeva, M. V. Pastukhov Technogenic impact of wastewater on the hydrochemical composition of the Angara River90

A. N. Eirikh, T. G. Serykh, E. A. Ovcharenko, D. P. Podchufarova, A. V. Kotovschikov Chemical composition of the surface water in the Ob River96

T. I. Kutyavina, I. A. Vartan, E. V. Shemyakina, V. V. Timina Hydrochemical conditions for the formation of wetland ecosystems in the Bylina State Nature Reserve103

E. A. Gornostaeva, G. I. Berezin, E. V. Dabakh Heavy metals in snow cover and urban soils110

ECOTOXICOLOGY

E. V. Fedoseeva, A. P. Kiryushina, D. I. Stom, V. A. Terekhova Resistance of soil micromycetes *Trichoderma viride* and *Alternaria alternata* to heavy metals Cu and Pb118

**ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION**

N. P. Khrunina, A. Yu. Cheban Reduction of technogenic geochemical fluxes during the operation of a polymineral deposit in the Far Eastern Region128

**POPULATION
ECOLOGY**

R. Berdja, L. Lamari, N. Bouras, M. D. Holtz Host by strain association study of rhizospheric actinobacteria on two Algerian date palm cultivars ...135

I. D. Svistova, N. N. Nazarenko Ecological trend of succession in mycobiome of the old botanical garden chernozem142

I. V. Novakovskaya, E. N. Patova, E. G. Makeeva Snow algae and cyanobacteria in several regions of the Urals and the Western Sayan ...149

V. A. Kovaleva, S. V. Deneva, Yu. A. Vinogradova, A. N. Panjukov, E. M. Lapteva The influence of landscape conditions on the functioning of microbial communities of postagrogenic soils of the tundra zone157

N. Y. Egorova, V. N. Suleymanova, E. V. Ryabova Ecological and demographic characteristics of *Cypripedium calceolus* L. coenopopulations in the Kirov region166

N. S. Korytin, V. V. Shiryaev Survival and reproductive value of different cohorts in the muskrat population (*Ondatra zibethicus* L.)175

E. M. Luchnikova, V. B. Ilyashenko, A. V. Kovalevskiy, S. I. Gashkov, L. A. Voronina, K. S. Zubko, A. V. Filippova Influence of various methods of forest reclamation on the restoration of the community of mammals in the dark coniferous taiga forests183

A. Ya. Grigoryevskaya, Yu. S. Gorbunova, T. A. Deviatova Phyto-diversity as an indicator of the restoration of the *Pinus sylvestris* L. formation of the Usman forest after a forest fire192

AGROECOLOGY

L. V. Pilip, N. V. Syrchina, V. A. Kozvonin, E. P. Kolevatykh, T. Ya. Ashikhmina, A. V. Sazanov Biological contamination of arable land with pig waste199

T. K. Sheshegova, I. N. Shchennikova, L. M. Shchekleina, S. A. Emelev, M. V. Cheremisinov, N. A. Zhilin Bioecological and immunological assessment of grain and plants of *Hordeum vulgare* L. in the conditions of the Kirov region206

A. V. Bakulina, D. V. Popyvanov, A. V. Kharina Study of the properties of local isolates of *Parastagonospora nodorum*212

N. V. Syrchina, L. V. Pilip, T. Ya. Ashikhmina Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste219

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

S. V. Zagirova, J. F. Mikhailov Seasonal variation of concentration and net CO₂ exchange in the spruce forest ecosystem of the middle taiga226

SOCIAL ECOLOGY

A. V. Minkina, S. A. Dvinskikh, T. V. Zueva An approach to the development of an integral index of ecological well-being of the territory235

INFORMATION

VIII Congress of the Society of Soil Scientists named after V. V. Dokuchaev ...241

Фитопатогенная биота в условиях потепления климата (обзор)

© 2022. Т. К. Шешегова, д. б. н., в. н. с.,

Л. М. Щеклеина, к. с.-х. н., с. н. с.,

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока

им. Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

e-mail: immunitet@fanc-sv.ru

В статье изложена информация о состоянии климатических факторов в Российской Федерации (РФ) за последние 100 лет: отмечено общее потепление климата на 1 °С, при этом за холодный период года – на 1,4 °С, тёплый – на 0,4 °С. Рассматриваются особенности изменения видовой и внутривидовой структуры фитопатогенных микроорганизмов, насекомых-вредителей и растительных сообществ в связи с динамикой климатических факторов на Евро-Северо-Востоке РФ, в частности, на территории Кировской области. Проанализированы положительные и отрицательные последствия потепления климата на растительно-микробные взаимодействия. Обоснована возможность появления новых фитопатогенов и насекомых-вредителей и элиминация существующей вредной биоты в условиях изменения экологии и климата. В Кировской области в связи с потеплением может снизиться вредоносность снежной плесени и появиться возможность полноценного возделывания таких культур, как озимая тритикале, озимый ячмень, зимующий овёс, но увеличится поражение зерновых культур спорыньей, семечковых и косточковых – монилиозом, полевых и садовых культур – вирусными болезнями. Велика вероятность появления новых болезней и вредителей, например, жёлтой ржавчины и жёлтой пятнистости, рамуляриоза и вредной черепашки на зерновых культурах. Появится необходимость в корректировке возделываемых культур и внедрении более теплолюбивых и нетрадиционных, например, кукурузы, сои, проса, сорго, яровой тритикале и др. Поэтому сельскохозяйственное производство и биологическая наука должны быть готовыми к региональным экологическим и климатическим изменениям.

Ключевые слова: климатические изменения, фитопатогенные микроорганизмы, насекомые-вредители, биоэкология микроорганизмов, болезни растений.

Phytopathogenic biota in the conditions of climate warming (review)© 2022. Т. К. Sheshegova ORCID: 0000-0003-2371-4949L. M. Shchekleina ORCID: 0000-0002-3589-5524

Federal Agricultural Research Center

of the North-East named N. V. Rudnitsky,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

e-mail: immunitet@fanc-sv.ru

The article provides information on the state of climatic factors in the Russian Federation over the past 100 years and notes the overall warming of the climate by 1 °C, while for the cold period of the year – by 1.4 °C, warm – by 0.4 °C. Further, the features of changes in the species and intraspecific structure of phytopathogenic microorganisms, insect pests and plant communities are considered in connection with the unfavorable dynamics of climatic factors in the Euro-North-East of the Russian Federation, including the Kirov region. The positive and negative consequences of climate warming on plant-microbial interactions are shown. The possibility of the emergence of new phytopathogens and insect pests and the elimination of the existing harmful biota under conditions of changing ecology and climate is substantiated. In the Kirov region, due to warming, the harmfulness of snow mold may decrease and it will be possible to fully cultivate such crops as winter triticale, winter barley, wintering oats, but the damage to grain crops by ergot, pome and stone fruits – by moniliosis, field and horticultural crops – by viral diseases will increase. New diseases and pests are likely to appear, such as yellow rust and yellow spot, ramularia and harmful bug on crops. There will be a need to adjust cultivated crops and introduce more heat-loving and non-traditional ones, for example, corn, soybeans, millet, sorghum, spring triticale, etc. Therefore, agricultural production and biological science must be prepared for regional environmental and climate changes.

Keywords: climate change, phytopathogenic microorganisms, insect pests, bioecology of microorganisms, plant diseases.

Экология и климат в последние годы становятся мощными экономическими и политическими факторами глобализации [1–4]. Климат в мире достаточно быстрыми темпами меняется. Хотя глобальное потепление продолжает оставаться темой интенсивных споров, но то, что оно происходит, уже практически никем не оспаривается. Однако региональные климатические тренды могут существенно отличаться от мировых. Данные 455 метеостанций показали, что с 1901 по 2005 гг. среднегодовая температура воздуха в России повысилась в среднем на 1 °С, при этом в холодный период – на 1,4 °С, тёплый – на 0,4 °С. В целом климат в России потеплел сильнее (на 0,76 °С), чем во всём мире [5].

Россия относится к числу стран, сельское хозяйство которой в значительной степени зависит от колебаний и изменений климатических показателей. При этом в последние десятилетия на большей части территории России отмечено улучшение условий формирования урожайности, снижение климатообусловленного риска для производства сельскохозяйственной продукции и рост биоклиматического потенциала [6, 7]. Так, на основании обобщения и анализа климатических данных за 53 года (1957–2010 гг.) выявлено усиление континентальности климата в Предуралье. При этом отмечено потепление в вегетационный период зерновых культур. Температура с мая по август повысилась на 0,6 °С, сумма осадков – на 64 мм. Продолжительность безморозного периода увеличилась за счёт осенних месяцев, а установление устойчивого снежного покрова отодвинулось на 20–25 дней позднее среднесезонных сроков. При анализе урожайности озимых зерновых культур выявлена достоверная зависимость её от среднесуточной температуры воздуха ($r = 0,68$) и суммы осадков ($r = 0,65$) [8].

Стратегической задачей XXI столетия, сформулированной на Всемирной конференции по изменению климата в 2003 г., является необходимость, с одной стороны, адаптироваться к экологическим и климатическим изменениям, а с другой – возможно предугадывать их [9].

Цель работы – на основе ретроспективного анализа литературных данных и собственных исследований оценить последствия потепления климата для сельскохозяйственного производства и обосновать возможные изменения в региональных микробных и растительных сообществах.

Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора является фитопатогенная биота (микроорганизмы и насекомые-вредители), видовая и внутривидовая структура которых способна значительно меняться под влиянием климатических факторов. Для обзора использованы литературные источники за период 2000–2022 гг. из базы данных научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, включающей публикации ведущих отечественных учёных-исследователей по данной тематике. Поиск литературы проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по ключевым словам: «потепление климата», «микроорганизмы», «насекомые-вредители», «болезни растений», «изменчивость биоты». Полученную информацию анализировали в соответствии с поставленной целью.

Положительные и отрицательные последствия потепления

Для Российской Федерации (РФ), относящейся к группе северных стран, потепление может иметь как негативные, так и позитивные последствия. Среди положительных результатов этого процесса для сельского хозяйства можно выделить следующее: увеличение площади земель, пригодных для земледелия, рост продолжительности вегетационного периода, улучшение условий перезимовки, влагообеспеченности и теплообеспеченности полевых и садовых культур. Вполне возможно, что на Центральное Нечерноземье, Верхнее Поволжье, Средний Урал, юг Западной Сибири распространятся климатические условия чернозёмных степей, что предполагает увеличение урожаев полевых культур в 1,5–2 раза [10]. Северные регионы Сибири и Якутии по мере достаточного увлажнения могут стать пригодными для выращивания более позднеспелых и высокопродуктивных культур, в том числе озимых зерновых [1]. По данным [11], климатическая составляющая изменчивости урожайности озимой пшеницы варьирует в широких пределах – от 30% (на Северном Кавказе) до 60% (в Северо-Восточных и Восточных регионах России). А по данным ФАНЦ Северо-Востока [12], в Кировской области доля этих факторов в сезонной динамике урожаев разных полевых культур достигает 40%. За период 1975–2008 гг. климатообусловленное изменение урожайности зерновых культур отмечено повсеместно, особенно

в отдельных районах Северного Кавказа и Поволжья [3, 4]. Однако высокие температуры могут привести и к негативным экологическим последствиям: уменьшению влажности почвы и общему дефициту воды, большому количеству фитопатогенов, сорняков и вредителей [13–15]. Наиболее ярким подтверждением прямой связи между изменением температуры и появлением нетрадиционной биоты в центральных и северных территориях РФ является колорадский жук, который со второй половины XX века интенсивно осваивал новые экологические ниши. Очевидно, что распространялся он в соответствии с тем, насколько температурный режим был благоприятен для его биологических потребностей. Вполне возможно, что следующим особо опасным вредителем, который может появиться на этих территориях при дальнейшем потеплении климата, станет саранча.

Изменение климатических факторов, несомненно, приведёт к региональной корректировке спектра возделываемых культур. В связи с потеплением климата в северных регионах РФ будут возделываться более теплолюбивые виды растений, а экономически и экологически оправданные ареалы холодостойких культур будут территориально ограничиваться [16]. Например, долгосрочные климатические прогнозы свидетельствуют, что для ряда регионов Евро-Северо-Востока РФ, в том числе Кировской области, в 10-летней перспективе вполне возможно выращивание для разных целей кукурузы, сои, проса, сорго, яровой тритикале, озимых форм ячменя и овса, нетрадиционных плодовых и ягодных культур. Судя по сумме эффективных температур (на севере области 1500–1700 °С, на юге – 1950–2100 °С), климат Кировской области создаёт в целом благоприятные условия для большинства возделываемых культур [17].

Однако следует учитывать, что вместе с интродуцированной культурой начнут аккумулироваться все присущие ей вредные организмы, поскольку погодные условия могут способствовать выживанию и расширению ареала возбудителей болезней и насекомых-вредителей [18, 19]. Кроме того, под действием более высоких температур, как правило, укорачивается продолжительность инкубационного периода патогена, увеличивается количество фитопатогенных микроорганизмов (МО) и генераций насекомых-вредителей и, как следствие, величина инфекционной нагрузки. Механизмы конституционального и индуцированного иммунитета не выдержи-

вают «натиска» инфекции, и устойчивость генотипа преодолевается. Возможна также постепенная, а порой и непрогнозируемая трансформация ранее неопасных видов в экономически значимые. При отсутствии оперативного реагирования на эти изменения возникает общая биотическая неустойчивость экосистем.

Влияние среды на биоэкологию некоторых микроорганизмов

Исходя из биологии фитопатогенов (требования к температуре, влажности, инсоляции в разные периоды инфекционного цикла и др.), можно полагать, что умеренно тёплые зимние месяцы в более северных широтах России будут способствовать выживанию видов *Fusarium* spp., *Helminthosporium* spp., *Alternaria* spp., *Sclerotinia* spp., *Typhula* spp., *Septoria* spp., *Claviceps* spp., *Venturia* spp. и ряда других холодостойких микромицетов. Уже сейчас на Евро-Северо-Востоке РФ мы отмечаем усиление вредоносности септориозных, фузариозных и гельминтоспориозных пятнистостей, склеротинии зерновых и бобовых культур, спорыньи, альтернариоза различных органов растений [20–23]. Повышение температуры в летний период будет благоприятствовать развитию грибов родов *Ustilago*, *Urocystis*, *Puccinia*, *Podosphaera*, *Erysiphe*, бактерий родов *Pseudomonas*, *Xanthomonas* и других термоустойчивых МО. В меньшей степени климатические изменения влияют на некоторые почвенные фитопатогены (*Pythium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia* и др.), так как они формируют зимующие инфекционные структуры, которые защищают их от внешних воздействий [19].

Изменения коснутся не только видового состава, но и внутривидовой структуры вредной биоты, поскольку факторы среды могут приводить к серьёзной корректировке направленного отбора, генетического состава популяций, патогенности и токсичности новых форм. Так, по данным [24, 25], повышение температуры индуцирует усиление токсинообразования грибов рр. *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, а двукратное сокращение инкубационного периода у вида *F. culmorum* в 10 раз увеличивает накопление дезоксиниваленона (токсин ДОН). Кроме того, одни и те же виды МО в разных экологических условиях могут значительно менять свои патогенные свойства. Это следует учитывать при возделывании новых сельскохозяйственных культур, так как

вместе с интродукцией можно занести вирулентные виды и штаммы-суперпродуценты токсинов. Например, широкое возделывание кукурузы на Евро-Северо-Востоке влечёт за собой заражённость зерна этой культуры и большинства зерновых культур эндемичным для этого региона фузариозным видом – *F. moniliforme*.

Тесная положительная связь существует между температурой и агрессивностью всех видов ржавчинных грибов [26]; температурой и образованием пикнид у септориозных грибов [27–30]; температурой и окончанием инкубационного периода у возбудителя фитофторы картофеля [31]. Температура может влиять также на проявление генов вертикальной и горизонтальной устойчивости растений к грибным и, особенно, бактериальным болезням. Известно, что при высокой температуре гены *Sr6*, *Sr24* и *Sr25* не защищают пшеницу от стеблевой ржавчины, а *Pg3* и *Pg4* – овёс от той же болезни. Температурозависимы гены устойчивости к гессенской мухе: *H10*, *H11*, *H12* у зерновых культур. При перепадах температур «не работает» ген *Vf*, обеспечивающий устойчивость яблони к парше [18, 19]. В условиях нетипично низких или высоких температур у всех растений может меняться даже характер наследования генов.

Распространение некоторых болезней в условиях нестабильности климата

Жёлтая ржавчина пшеницы (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*), поражающая все зерновые культуры и имеющая наибольшую вредоносность в Азии, на Ближнем Востоке и юге России, постепенно продвигается в северные зоны. С небольшой степенью поражения посевов она диагностируется в Татарстане, Башкирии, а в 2019 г. впервые обнаружена в Кировской области. Развитие болезни на отдельных сортах яровой пшеницы в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока превышало 20% [32]. Расширились ареалы септориоза пшеницы (*Septoria nodorum* Berk. и *Septoria tritici* et Desm.) и других зерновых культур, а эпифитотии с частотой от 2 до 8 раз за 10 лет возникают во всех зернопроизводящих регионах РФ [28–30]. Как правило, септориоз усиливается в условиях жаркой погоды в период интенсивного нарастания надземной биомассы растений (конец июня – июль). Обусловленные видами *Alternaria* spp., *Cladosporium* spp., *Helminthosporium* spp. «чёрнь колоса» и «чёрный зародыш», наоборот, сильнее

проявляются во влажных условиях вегетации. При избыточном увлажнении в период налива заражённость зерна видами *Alternaria* spp. достигает 90%, *Cladosporium* spp. – 50% [33–35].

Новым заболеванием пшеницы в северо-западном регионе России является жёлтая пятнистость (*Pyrenophora tritici-repentis*), которая с 2005 г. усиливает поражение посевов озимых и яровых форм этой культуры [18]. В 2012 г. в Архангельской области и некоторых районах Республики Коми у ячменя идентифицирована совершенно новая болезнь – рамуляриоз, возбудитель которой *Ramularia collo-cygni* – термофил, границы ареала которого ранее были за пределами РФ [36].

Фузариозные болезни в настоящее время распространены повсеместно с тем или иным уровнем вредоносности. Поскольку большинство видов *Fusarium* spp. способны существовать в широком диапазоне температур, то основным лимитирующим фактором для развития заболеваний является влажность (осадки, туманы, росы). Тем не менее имеются виды, предъявляющие особые требования к температуре. Среди них *Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & I.C. Hallett (син.: *Fusarium nivale* Ces. ex Berl. & Voglino) – очень холодостойкий гриб, вызывающий снежную плесень озимых зерновых культур и злаковых трав. Вредоносность его во многих регионах с потеплением холодных месяцев, очевидно, снизится. Другой вид – *F. graminearum* Schwabe теплолюбивый, вызывающий фузариозы генеративных органов и зерна и распространённый на Дальнем Востоке, Северном Кавказе, в центрально-чернозёмном регионе. Однако в последние годы его диагностируют как возбудителя фузариозов в северо-западном регионе и во многих областях (в том числе в Кировской области) Нечерноземной зоны [37–39].

По нашим наблюдениям и данным филиала ФГУ «Россельхозцентр» по Кировской области, за последние 10–15 лет проявляется тенденция усиления поражения козлятника восточного грибом *Sclerotinia trifoliorum* Elen., который является возбудителем рака клевера [22]. Теперь патоген осваивает новые экологические ниши и формируемые новые трофические связи, паразитируя на других бобовых культурах. С 2011 г. в связи с участием влажными условиями в период вегетации растений увеличивается поражение всех семечковых и косточковых культур монилиолизом (*Monilia fructigena* Honey), а земляники садовой – земляничным клещом

(*Tarsonemus pallidus* Banks). Из-за интенсивного размножения тлей, провоцируемого нестабильностью температурного режима в летний период, засорённостью посевов и обочин полей злаковыми сорняками, на которых сохраняются насекомые, на многих полевых и садовых культурах усиливается развитие вирусных болезней с симптомами желтух, покраснения, деформации. Специалисты прогнозируют дальнейшее повышение вредоносности болезней вирусной этиологии [18, 19, 40, 41]. На горохе и пелюшке паразитирует гороховая зерновка (*Bruchus pisorum* L.), сильному распространению которой в отдельные годы препятствуют недостаток тепла в период кладки яиц и возделывание культур на зерносеяж и силос. Однако семеноводческие посевы более уязвимы, так как жук зимует внутри зерновки. Устойчиво держатся в посевах, биоценозах залежей и бросовых земель все злаковые мухи, виды совок и тли, хлебная полосатая блошка, жуки-щелкуны, хлебные жуки и другие вредители, способные при наступлении благоприятных условий размножаться в больших количествах [42]. Следует отметить наличие в южных районах Волго-Вятского региона саранчи, которая, вероятно, попала сюда с транспортом. Однако погодные условия позволяют ей перезимовывать, равно как и вредной черепашке, которая также нетипична для большей части территории этого региона.

Распространение спорыньи

В последнее десятилетие серьёзную биоэкологическую опасность представляет повсеместное нарастание спорыньи (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) в посевах ржи, пшеницы и даже ячменя [23, 43–45]. В какой-то мере это обусловлено ориентацией крупного сельскохозяйственного производства (агрохолдинги) на энерго- и ресурсосберегающие агротехнологии, нарушением основной обработки почвы и севооборотов, наличием огромных территорий запущенных (бросовых) земель, а также благоприятными для патогена *C. purpurea* погодными условиями в период инфицирования завязи цветка [46]. Одной из основных причин разного рода эпифитотий является возделывание монокультур на обширных территориях [47]. В Кировской области спорынья проявляется на половине посевов озимых зерновых культур. Доля поражённых растений в сортовых биоценозах ржи достигала 8,0% [23]. Сильнее поражаются посевы в западной и юго-западной зонах области, где погодные

условия в сочетании с возможными нарушениями технологии возделывания благоприятствуют заражению. Следует отметить, что хозяйства с высокой культурой земледелия стали заложниками окружающих территорий (залежь, бросовые земли, бывшие кормовые угодья), с которых на посевные площади переходят все вредные организмы, в том числе и аскоспоры *C. purpurea*.

Как мы отмечали ранее [43], роль гриба *C. purpurea* в народном хозяйстве далеко неоднозначна. С одной стороны, это фитопатоген, поражающий все зерновые культуры и злаковые травы, вред от которого заключается в снижении продуктивности растений и образовании вместо зерна склероциев, которые содержат опасные токсины эргоалкалоиды (ЭА). Их избыточное содержание в кормах и зернопродуктах вызывает заболевание человека и животных – эрготизм. С другой – эти же ЭА незаменимы как компонент более 80 лекарственных препаратов [48].

Хотя способность гриба *C. purpurea* продуцировать ЭА генетически детерминирована, их количество и состав зависят от растения-хозяина, географических и климатических факторов. При переработке зерна в муку токсичность её может значительно увеличиться из-за размола самих склероциев. Поэтому даже незначительное содержание склероциев в зерновой массе вызывает накопление токсинов в муке и продуктах питания.

В ФАНЦ Северо-Востока в содружестве с Институтом биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина РАН изучена токсичность кировской популяции гриба *C. purpurea*. Установлена слабая филогенетическая изменчивость в структуре ЭА. У изученных культур (рожь, пшеница) наиболее распространёнными ЭА были эргокристин и его стереоизомер – эргокристинин [49, 50]. Такая структура ЭА остаётся достаточно стабильной как во времени, так и в пространстве. Это может свидетельствовать об определённом расовом составе *C. purpurea* и позволяет использовать любой штамм патогена для иммунологических и селекционных работ. Выявлены сорта озимой ржи (Лика, Симфония, Гармония, Леда, Подарок НП, Чулпан 2, Вавиловская НП, Россиянка 2, Тринодис 4 – Минвак-139/09 НП, Красноярская универсальная НП) и яровой мягкой пшеницы (Т-33, С-65, У-80, У-28, С-84, Т-123, Т-141, Новосибирская 18, Тулайковская надежда, Кайыр, Ul Alta Blanca, Eros) с высокой устойчивостью к спорынье, а также генотипы ржи (Лика,

Графит, Перепел, Гармония, Симфония, Ниоба, Садко, Роса, Сара) и пшеницы (Традиция, Т-38, Оренбургская 23, Ерос) не накапливающие в склероциях ЭА. В этом случае склероции, встречающиеся в зерновой массе, представляют собой неопасную биологическую примесь. В настоящее время выявленные в процессе иммунологических исследований генотипы используются в качестве источников устойчивости при селекции новых сортов. С их использованием создаётся новый селекционный материал, проходящий дальнейшие исследования по другим признакам. Устойчивые и урожайные сорта озимой ржи Лика и яровой пшеницы Традиция с 2022 г. проходят государственное испытание.

В наших исследованиях установлена отрицательная связь между массой склероция и содержанием ЭА. Учитывая, что мелкие склероции невозможно полностью отделить из зернового вороха посредством механической сортировки [51–53], и часть их попадает в семенные, продовольственные и фуражные партии зерна, биоэкологическая опасность этой фракции представляется наиболее серьёзной. Такие склероции чаще всего формируются на недоразвитых стеблях, а также во влажных условиях созревания зерна и при запаздывании с уборкой.

Выявлено, что состояние климатических факторов оказывает избирательное действие на отдельные этапы развития гриба *C. purpurea*. Поражение растений спорыньей усиливается при избыточных осадках в мае, когда склероции гриба начинают прорастать и формировать плодовые тела с аскоспорами и относительно высокой температуре в первой половине июня, когда наблюдается заражение завязи растений от аскоспор. Осадки и влажность почвы на глубине 4–20 см влияют не только на прорастание склероциев, но и на уровень потенциальной инфекции. Обнаружено, что при количестве осадков в мае, близкому к норме, на одной склероции формировалось от 3 до 44 плодовых тел при среднем значении – 14,2. В засушливых условиях (21 и 47% от нормы осадков за май) среднее количество сформировавшихся плодовых тел на склероциях снижалось в 1,9–2,5 раза [44, 46]. Выявленные тенденции могут быть использованы в сезонном прогнозе уровня развития спорыньи в посевах.

Заключение

Обобщая климатообусловленные риски для сельскохозяйственного производства,

следует отметить возросшую актуальность исследований в области экологии и биологии фитопатогенов, насекомых-вредителей и их взаимоотношений с культурными и дикорастущими растениями для оперативной корректировки селекционно-семеноводческого и технологического процессов. Сельхозтоваропроизводители должны знать и помнить, что любое нарушение технологии возделывания культуры – это своего рода «подарок» фитопатогенам, насекомым-вредителям и сорнякам. Несвоевременное решение возникшей фитосанитарной проблемы чревато кратным увеличением пестицидной нагрузки на полевые биоценозы, снижением урожайности, вплоть до экономической нецелесообразности возделывания культуры.

References

1. Akhmedov A.D., Yakunin D.A. Climate change and agricultural production // Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2011. No. 5. P. 18–19 (in Russian).
2. Zakharov I.A. Ecological genetics and modern problems of biosphere // Uspekhi sovremennoy biologii. 2020. V. 140. No. 2. P. 107–115 (in Russian). doi: 10.31857/S0042132420020118
3. Sirotenko O.D., Pavlova V.N. Assessment of the impact of climate change on agriculture by the method of spatio-temporal analogues // Meteorologiya i gidrologiya. 2003. No. 8. P. 89–99 (in Russian).
4. Sirotenko O.D., Pavlova V.N. A new approach to identifying year–yield functionals for assessing climate change impacts // Meteorologiya i gidrologiya. 2010. No. 2. P. 92–100 (in Russian).
5. Yarovikova E. Global warming starts from Russia // Life. 2010. No. 6. P. 10–16 (in Russian).
6. Sukhotin Yu.M., Moiseev Yu.V. Global climate change and its impact on Russian agriculture // Informatsonnyy byulleten Ministerstva selskogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii. 2000. No. 9–10. P. 59–62 (in Russian).
7. Petrov V.S., Mishko A.E., Tsiku D.M., Marmorshstein A.A. Improvement of the gene pool of grapes based on agrobiological and physiological-biochemical evaluation of new genotypes of selection by S.E. Gusev in unstable conditions of the temperate continental climate of southern Russia // Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2022. No. 183 (2). P. 137–148 (in Russian). doi: 10.30901/2227-8834-2022-2-137-148
8. Kosolapova A.I., Vasbieva M.T. Influence of changes in climatic indicators in the Perm region on the productivity of grain crops // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2011. No. 11. P. 9–11 (in Russian).
9. Zhuchenko A.A. Adaptive crop production (ecological and genetic foundations): theory and practice. V. 2. Moskva: Agrorus, 2009. 1089 p. (in Russian).

10. Yakunin D.A., Musaelyan S.M. Forecasts of the impact of climate change on agriculture in the Lower Volga region // *Izvestiya Nizhegorodskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*. 2011. No. 2. P. 80–86 (in Russian).
11. Zhuchenko A.A. Adaptive strategy for sustainable development of Russian agriculture in the 21st century. Theory and practice. V. 1. Moskva: Publishing house Agrorus, 2009. 816 p. (in Russian).
12. Mukhamadyarov F.F., Sirotenko O.D. Climate change // *Perspectives of northern crop production: Materialy shkoly molodykh uchenykh po ekologo-geneticheskim osnovam severnogo rastenievodstva*. Kirov: Research Institute of Agriculture of the North-East, 2008. P. 6–17 (in Russian).
13. Ovsyannikov Yu.A. Possible consequences of climate change for agriculture // *Agrarnyy vestnik Urala*. 2006. No. 1. P. 15–17 (in Russian).
14. Frolov A. Patterns of pest population dynamics and phytosanitary forecast // *Novosti zashchity rasteniy*. 2019. No. 3. P. 4–33 (in Russian). doi: 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-4-33
15. Sanin S.S. Plant protection and sustainable agriculture in the 21st century // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2020. No. 4. P. 9–16 (in Russian).
16. Skrizhalina L. Regional climate changes and their likely consequences [Internet resource] <https://pandia.ru/text/78/126/80943.php?ysclid=l6diwm2v4f960829070> (Accessed: 01.08.2022) (in Russian).
17. On the state of the environment of the Kirov region in 2020: Regional report / Ed. A.V. Albegova. Kirov, 2021. 205 p. [Internet resource] <https://www.kirovreg.ru/econom/ecology/%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%202020.pdf> (Accessed: 07.29.2022) (in Russian).
18. Levitin M.M. Protection of plants from diseases during global warming // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2012. No. 8. P. 16–17 (in Russian).
19. Levitin M.M. Microorganisms in the context of global climate change // *Selskokhozyaystvennaya biologiya*. 2015. V. 15. No. 5. P. 641–647 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.641rus
20. Sheshegova T.K. Problems and priorities of scientific research in the field of agroecology and crop production in the Euro-North-East // *Agricultural Science Euro-North-East*. 2006. No. 8. P. 13–15 (in Russian).
21. Sheshegova T.K., Shchekleina L.M., Shchenikova I.G., Martyanova A.N. Dependence of the fungal infection of grain crops on the seasonal dynamics of climatic factors // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2017. V. 31. No. 4. P. 58–62 (in Russian).
22. Sheshegova T.K. Analysis of the phytosanitary state of spring grain crops in the Kirov region (analytical review) // *Agricultural Science Euro-North-East*. 2015. No. 5 (48). P. 10–14 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2015.48.5.10-14
23. Shchekleina L.M. Influence of weather factors on individual periods of development of the fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. and the level of ergot injuriousness in the Kirov region // *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. V. 20. No. 2. P. 134–143 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143
24. Monastyrsky O.V. Toxin-forming fungi parasitizing on grain // *Agro XXI*. 2001. No. 11. P. 6–7 (in Russian).
25. Monastyrsky O.V. Bioprotection of grain crops from toxinogenic microorganisms // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2003. No. 2. P. 5–8 (in Russian).
26. Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. Agroecological aspects of the development of *Puccinia dispersa* Eriks. and *Puccinia graminis* Pers. on crops of winter rye in the Kirov region // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2019. V. 14. No. 1 (52). P. 65–70 (in Russian). doi: 10.12737/article_5ccedbb2724b13.28786713
27. Sanin S.S. Phytosanitary problems of intensive crop production // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2013. No. 12. P. 3–8 (in Russian).
28. Sanin S.S., Sandukhadze B.I., Mamedov R.Z., Karlova L.V., Korneva L.G., Ruleva O.M., Sanin S.T. Technologies of intensive grain production and plant protection // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2021. No. 5. P. 9–16 (in Russian).
29. Sanin S.S., Sandukhadze B.I., Mamedov R.Z., Karlova L.V., Korneva L.G., Ruleva O.M. Intensification of wheat grain production, phytosanitary and plant protection in the central region of Russia // *Agrochemistry*. 2020. No. 10. P. 36–44 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188120100105
30. Sanin S.S., Korneva L.G., Zhokhova T.P., Polyakova T.M., Akimova E.A. Determination of wheat yield losses from septoria leaves and ears // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2012. No. 8. P. 47–49 (in Russian).
31. Zadvornev V.A., Porsev I.N., Sazhina S.V. Integrated protection of potato varieties from pests and diseases in the southern Trans-Urals // *Priority directions of regional development. Sbornik statey po materialam III Vserossiyskoy (natsionalnoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kurgan, 2022. P. 336–341 (in Russian).
32. Sheshegova T.K., Volkova L.V., Shchekleina L.M. Collection of VIR as a reserve of spring soft wheat gene pool resistant to septoria // *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Selskokhozyaystvennye nauki. Ekonomicheskie nauki"*. 2019. V. 5. No. 1. P. 57–65 (in Russian). doi: 10.30914/2411-9687-2019-5-1-57-65
33. Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. White ears on varieties of winter rye in the agroecological conditions of the Kirov region // *Agrarnyy vestnik Urala*. 2020. No. 02 (193). P. 27–36. doi: 10.32417/1997-4868-2020-193-2-27-36
34. Sheshegova T.K., Shchekleina L.M. Composition of microorganisms found in winter rye grain in Kirov region // *Russian Agricultural Sciences*. 2021. V. 47. No. 4. P. 370–376. doi: 10.3103/S1068367421040170

35. Gavrilova O.P., Orina A.S., Gogina N.N., Gagkaeva T.Yu. Co-occurrence of metabolites of fungi *Alternaria* and *Fusarium* associated with grain crops // Russian Agricultural Science. 2020. No. 6. P. 20–23 (in Russian). doi: 10.31857/S2500262720060058
36. Afanasenko O.S., Havis N., Bepalova L.A., Ablova I.B., Maryenko V.I. Ramulariasis – a new barley disease for Russia // Zashchita i karantin rasteniy. 2012. No. 1. P. 11–13 (in Russian).
37. Shchekleina L.M. Monitoring of diseases of winter rye in the Kirov region and possible directions of breeding for immunity // Agricultural Science Euro-North-East. 2020. No. 21 (2). P. 124–132 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9084.2020.21.2.124-132
38. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. Diseases of *Secale cereale* L. in the Kirov region and genetic sources of resistance for breeding // Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2020. No. 6. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.36718/1819-4036-2020-6-86-92
39. Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P., Levitin M.M., Novozhilov K.V. Fusarium of grain crops // Supplement to the journal “Protection and Quarantine of Plants”. 2011. No. 5. 51 p. (in Russian).
40. Zhuykova O.A., Batalova G.A., Sheshhegova T.K. The state of the oat gene pool in terms of resistance to major diseases and swedish fly, the sources of the trait in the North-East of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation // Agricultural Science Euro-North-East. 2011. No. 5 (24). P. 4–7 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9084.2011.24.5.04-07
41. Eremin D.I., Menshchikova A.A., Cherevko T.M. Diseases of oats and its genetic resistance // Epokha nauki. 2022. No. 29. P. 12–17 (in Russian). doi: 10.24412/2409-3203-2022-29-12-17
42. Review of the phytosanitary state of crops in the Russian Federation in 2021 and the forecast for the development of harmful objects in 2022. Moskva: Ministerstvo selskogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii, Rossiyskiy selskokhozyaystvennyy tsentr, 2022. 476 p. (in Russian).
43. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. The problem of ergot cereals (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): history and modernity (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 1. P. 5–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-005-012
44. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M. Ecological aspects of the development of ergot (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) on rye crops // Agroekologicheskiy vestnik. 2016. No. 7. P. 83–90 (in Russian).
45. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K., Utkina E.I. Search for immunologically valuable genotypes of winter rye using individual parameters of nonspecific resistance // Agricultural Science Euro-North-East. 2021. No. 22 (4). P. 507–517 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9084.2021.22.4.507-517
46. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. The harmfulness of ergot on new varieties of winter rye in the Kirov region // Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Selskokhozyaystvennyye nauki. Ekonomicheskie nauki”. 2018. V. 4. No. 2. P. 83–89 (in Russian). doi: 10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89
47. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Starikov P.A., Gornostaeva E.A., Ashikhmina T.Ya. Microbes-antagonists against phytopathogenic bacteria and fungi (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 6–14. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014
48. Bykov V.A., Sokolskaya T.A., Sidelnikov N.I. A unique center for medicinal plant growing // Plant Protection and Quarantine. 2012. No. 8. P. 3–7.
49. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Zhelifonova V.P., Antipova T.V., Baskunov B.P., Kozlovsky A.G. The resistance of rye varieties to ergot and the content of ergoalkaloids in the sclerotia of *Claviceps purpurea* in the conditions of the Kirov region // Mikologiya i fitopatologiya. 2019. V. 53. No. 3. P. 177–182 (in Russian). doi: 10.1134/S0026364819030127
50. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Antipova T.V., Zhelifonova V.P., Kozlovsky A.G. Search for rye and wheat genotypes resistant to *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. and not accumulating ergoalkaloids in the sclerotia of the fungus // Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2021. V. 56. P. 549–558 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.549rus
51. Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Experimental substantiation of the effective height of a grain falling by a stream of liquid in an ergot release device // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 341. Article No. 012123. doi: 10.1088/1755-1315/341/1/012123
52. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Theoretical background of calculating of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia // Russian Agricultural Sciences. 2017. V. 43. No. 3. P. 273–276. doi: 10.3103/S1068367417030156
53. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Investigation of the parameters of grain movement in the liquid of an ergot removal device // Inzhenernye tekhnologii i sistemy. 2019. No. 29 (2). P. 248–264 (in Russian). doi: 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264

Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор)

© 2022. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор,
С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., А. Л. Ковина², к. б. н., доцент,
А. И. Коротких², аспирант, П. А. Стариков², аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: dli-alga@mail.ru

В обзоре представлены результаты исследований по особенностям растительного микробиома при антропогенном загрязнении почвы и возможностям его регулирования для проведения биоремедиационных мероприятий. Любой тип загрязнения почвы, включая появление инвазивных растений, приводит к перестройке аборигенных микробных комплексов, что проявляется в уменьшении видового состава, снижении численности определённых групп микроорганизмов (МО), вспышках численности фитопатогенов и токсинообразователей, а также меланизации микромицетных комплексов. Подобные негативные изменения в микробных комплексах становятся причиной угнетения растений и снижения их продуктивности.

Известно, что в почве любого типа в процессе сожительства растений и ризосферной микробиоты складывается холобионт, представляющий собой единство хозяина и всех его симбиотических сожителей. При этом численность микробного компонента холобионта может достигать до 10 тыс. видов, а численность клеток МО в ризосфере до 10¹¹ КОЕ/г. Во многом химическая природа и объём корневых выделений являются регуляторами численности, видового и группового состава МО. Устойчивость растений к стрессовым абиотическим и биотическим факторам определяется наличием и функционированием ризосферного микробиома, поэтому не только природные и искусственно сконструированные растительно-микробные комплексы являются перспективными агентами при ремедиации почв, загрязнённых различными поллютантами. Среди наиболее интересных групп МО-интродуцентов можно выделить представителей цианобактерий, псевдомоноад, бацилл, актиномицетов, микромицетов р. *Trichoderma*. Растительно-микробные комплексы, обогащённые данными группами МО, были успешно использованы для биоремедиации почв, загрязнённых нефтью, нефтепродуктами, тяжёлыми металлами, бенз[а]пиреном и фитопатогенами. Поэтому одной из актуальных задач современной агробиотехнологии является выделение в чистые культуры полезных представителей ризосферной микробиоты и создание для этих целей искусственных растительно-микробных комплексов, обогащённых МО антагонистами, ростстимуляторами, деструкторами поллютантов.

Ключевые слова: холобионт, хологеном, растительно-микробные комплексы, загрязнение почв, биоремедиация.

Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review)

© 2022. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187,
A. L. Kovina² ORCID: 0000-0003-0503-3402, A. I. Korotkikh² ORCID: 0000-0002-0700-371X,
P. A. Starikov² ORCID: 0000-0002-3205-6696, T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: dli-alga@mail.ru

The review presents the results of studies on the characteristics of the plant microbiome under anthropogenic soil pollution and the possibilities of its regulation for bioremediation measures. Any type of soil pollution, including the appearance of invasive plants, leads to the rearrangement of native microbial complexes, which manifests itself in a decrease in the species composition, a decrease in the abundance of certain groups of microorganisms (MO), outbreaks in the abundance of phytopathogens and antagonist microbes, toxin formers, and melanization of micromycete complexes. Such negative changes in microbial complexes become the cause of inhibition of plants and a decrease in their productivity.

It is known that in the soil of any type, in the process of cohabitation of plants and rhizospheric microbiota, a holobiont is formed, which is the unity of the host and all its symbiotic microbes. At the same time, the number of the microbial component of the holobiont can reach up to 10 thousand species, and the number of microbial cells in the rhizosphere can reach 10^{11} CFU/g. In many ways, the chemical nature and volume of root secretions are regulators of the abundance, species and group composition of MO. Plant resistance to stressful abiotic and biotic factors is determined by the presence and functioning of the rhizosphere microbiome; therefore, not only natural and artificially constructed plant-microbial complexes are promising agents in the remediation of soils contaminated with various pollutants. Among the most promising groups of MO-introducers, representatives of cyanobacteria, pseudomonas, bacilli, actinomycetes, micromycetes of genus *Trichoderma*. Plant-microbial complexes enriched with these MO groups were successfully used for bioremediation of soils contaminated with oil, oil products, heavy metals, benzo[a]pyrene, and phytopathogens. Therefore, one of the urgent tasks of modern agrobiotechnology is the isolation of useful representatives of the rhizosphere microbiota into pure cultures and the creation of artificial plant-microbial complexes enriched with MO antagonists, growth stimulators, and pollutant decomposers for these purposes.

Keywords: holobiont, hologenome, plant-microbial complexes, soil pollution, bioremediation.

Плодородие почвы и, следовательно, урожайность сельскохозяйственных культур во многом определяются характером отношений, которые в процессе вегетации складываются между растением и его аборигенной ризоплановой и ризосферной микробиотой. Растительные микробиомы могут оказывать воздействие на количество и качество урожая, на устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам [1, 2]. На растительно-микробные отношения оказывает воздействие целый комплекс факторов: тип почвы, вид растения, климатические условия, агротехнические мероприятия, наличие фитопатогенов и вредителей, а также интродукция в почву посторонних микроорганизмов (МО), входящих в состав биопрепаратов. Процессы взаимодействия растения и микробиоты разноплановы и могут протекать в прямо противоположных направлениях, обеспечивая или процветание растения, или его угнетение. При этом в любом случае микробиом в целом всегда находится в выигрышном положении, так как может питаться не только экзометаболитами растений, но и использовать в качестве объекта питания клетки и ткани растения [3].

Увеличение потребностей в продуктах питания в связи с ростом народонаселения повышает важность изучения взаимоотношений растений с их микробиомами для «эксплуатации» микробного населения как почвы в целом, так и растительного холобионта в сторону увеличения урожайности и снижения агрессивности фитопатогенов [2, 4, 5].

На сегодняшний день одной из задач агробиологии является широкое использование растительно-микробных комплексов для становления супрессивности почвы при её

химическом и биологическом загрязнении, а также повышение урожайности растений и качества растениеводческой продукции.

Цель данного обзора дать характеристику особенностей растительного микробиома при антропогенном загрязнении почвы и возможностей его регулирования для проведения биоремедиационных мероприятий.

Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора является анализ особенностей растительного микробиома при антропогенном загрязнении почвы и возможностей его регулирования для проведения биоремедиационных мероприятий. Для обзора использованы литературные источники (1983–2021 гг.) из базы данных научной электронной библиотеки, включающей публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике. Поиск источников проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по поисковым запросам: «растительно-микробный комплекс», «холобионт», «хологеном», «ризосфера», «ризоплана», «микробы-антагонисты», «биоремедиация». По полученным материалам выявлена специфика изменений растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почв.

Понятие о холобионтах и хологеноме как комплексе растения и его микробиома

Постоянными сожителями растений являются МО (вирусы, бактерии, грибы и во-

доросли). В этом плане подобные комплексы макро- и микроорганизмов полностью аналогичны тем, что возникли в результате параллельной эволюции человека и животных с микробным миром [6]. Согласно теории хологенома, растения и животные не рассматриваются как автономные единицы, но как биомолекулярные сети, состоящие из геномов хозяина (макроорганизма) и ассоциированных МО [7]. Холобионт рассматривается как единство макроорганизма хозяина и всех сопутствующих ему МО. Среди 10 принципов холобионтов и хологенома в свете отношений хозяина и микробиома одно из важнейших положений – холобионты и хологеномы являются единицей биологической организации [8, 9]. Хологеномная концепция постулирует, что холобионт (хозяин плюс симбионты) и его вариации могут подвергаться эволюционным изменениям [10]. Поэтому многоклеточные организмы не могут больше рассматриваться как индивидуальные единицы [11–13]. Согласно выдвинутой концепции, основанной на многочисленных исследованиях, все многоклеточные организмы содержат обильную и разнообразную микробиоту. При этом очень часто численность микробных клеток и сумма их генетической информации существенно выше, чем у хозяина. Не только геном хозяина, но и геном микробиома может передаваться через поколения с определённой точностью и, таким образом, обеспечивать уникальные свойства холобионта. Взаимодействие микробиоты и хозяина происходит различными путями, включая морфологию, развитие, физиологию и устойчивость к болезням. Генетические варианты хологенома могут быть связаны как с изменением генома хозяина, так и с изменением в микробиоте. Поскольку микробиом может гораздо быстрее адаптироваться к изменению условий окружающей среды (ОС), чем геном хозяина, он играет основную роль в адаптации и эволюции холобионта.

В растительно-микробном холобионте микробные сообщества – это резервуар огромного разнообразия видов [14, 15]. По некоторым данным число видов бактерий в филосфере – 252 [16], а в ризосфере может достигать от 3000 до 10000 видов [17]. Численность же микробов в ризосфере может доходить до 10^9 – 10^{11} бактерий и 10^6 грибов (КОЕ в 1 г почвы) [18, 19]. Кроме того, холобионт включает, наряду с другими МО, и вирусы, а хологеном – вирус.

Ризосфера – наиболее «горячая» зона в почвенных ценозах. Именно в ризосфере происходят основные процессы, влияющие

как на плодородие почвы, так и на состояние высшего растения. Объём экзометаболитов растений может достигать до 40% от продукции фотосинтеза [20], благодаря этому численность микробов в ризосфере намного выше, чем в окружающей почве. Данное явление давно получило название «ризосферный эффект». Во многом именно химическая природа и объём корневых выделений являются регуляторами численности, группового и видового состава МО [21, 22]. Микробиота ризосферы и ризопланы – пограничная зона, отделяющая отношения типа комменсализма, с одной стороны, от паразитизма, при котором МО некротизируют клетки хозяина и используют их для питания; с другой, от мутуализма. Мутуалистический симбиоз – одно из наиболее сложных явлений в сожительстве организмов, предполагающее эволюцию микробного партнёра, сопряжённую с глубокими преобразованиями процессов передачи, хранения и экспрессии наследственной информации [23, 24]. В данном плане наиболее изученным является симбиогенез бобовых с бактериями р. *Rhizobium*, позволяющий одновременно решить социальную задачу: повышение плодородия почвы, обеспечение людей полноценной высокобелковой пищей, а животных – высокобелковыми кормами.

Ризосферные и ризоплановые микробы как возможные предшественники мутуалистических симбиозов, также решают важнейшие задачи в жизни растений, к числу которых относится снабжение растений минеральными элементами, высвобождаемыми из органических остатков в результате минерализационной деятельности МО, накопление азота в почве при активности бактерий-азотфиксаторов, роста активизирующая и антагонистическая деятельность микробных партнёров растения [16, 17]. Роль почвенной микробиоты многократно возрастает в условиях стресса, который испытывают растения при загрязнении почвы поллютантами различной химической природы, а также при возрастающей агрессивности фитопатогенов, размножение которых во многом провоцируется не только и не столько неправильной агротехникой, а попаданием в почву веществ, обеспечивающих селективный отбор устойчивых форм, часто коррелирующий со склонностью к паразитизму.

Давно установлено, что в ризосферных микробиомах растения обладают способностью в определённой степени регулировать состав своих микробных партнёров, а также установлен факт специфичности микробного

состава ризосферы разных видов [17] и даже сортов [25] растений, произрастающих на одной и той же почве. Практическая значимость ризосферной микробиоты проявляется не только во время вегетации растений. Выделение в чистые культуры определённых штаммов МО, обладающих ценными для растений и человека свойствами, – актуальная задача современной микробиотехнологии. Этот процесс осуществляют уже десятки лет, выделяют всё новые и новые микробы-продуценты ценных биологически активных веществ, используемые для создания биопрепаратов различной направленности. При этом среди ризосферных МО попадают важные не только для сельского хозяйства, но и для медицины. В частности, в настоящее время большой проблемой является невозможность усвоения глютена, входящего в состав белков злаков, достаточным количеством людей из-за отсутствия у них соответствующего протеолитического фермента. В то же время из ризосферы нескольких растений (*Solanum tuberosum*, *Daucus sativus*, *Beta vulgaris*, *Jerusalem artichoke*) были выделены бактерии, представители семейств Enterobacteriaceae, Bacillaceae, Clostridiaceae, способные к деградации глютена. Из них три бактерии *Bacillus pumilus*, *Clostridium subterminale*, *C. sporogenes* использованы для синтеза протеазы, способной расщеплять глютен, делая продукты из злаков безопасными для людей с целиакией [5].

Источником полезных МО могут быть не только современные растения. Так, из ризосферной почвы гербарного образца лютика ядовитого (*Ranunculus sceleratus*), собранного ещё в 1899 г., выделен микробиот *Trichoderma* sp., обладающий чрезвычайно высокой антагонистической активностью по отношению к фитопатогенным грибам р. *Fusarium* [26–27].

Таким образом, приведённые примеры холобионтной сущности ризосферной микробиоты с растением-хозяином позволяют рассматривать это единство как фактор управления полезными членами микробиома с одновременным подавлением нежелательных компонентов.

Патологические изменения комплекса ризосферной микробиоты при антропогенном загрязнении почвы

При загрязнении почвы поллютантами химической и биологической природы часто отмечаются изменения численности и соотношения основных физиологических групп МО.

Среди основных поллютантов, попадающих в почву, можно отметить нефть и нефтепродукты (НП), соединения тяжёлых металлов (ТМ), микробиоту инвазивных растений и фитопатогенов.

Так, присутствие нефти в почве может как стимулировать размножение и развитие МО, так и угнетать их. В частности, происходит увеличение численности аммонифицирующих, азотфиксирующих, денитрифицирующих бактерий, микромицетов, и уменьшение численности нитрифицирующих бактерий и актиномицетов [28–31].

Загрязнение почвы нефтью активизировало развитие популяции МО-деструкторов нефти. Нефть в концентрации до 5% в почве стимулировала рост численности и окислительную активность углеводородокисляющих почвенных МО (УМО) [32]. Численность УМО в ризосфере растений увеличивалась на 1–2 порядка уже в первые 10 сут и ещё на 1–2 порядка – через 20 сут [33]. По сравнению с контролем в почвах, загрязнённых соединениями серы и НП, в 400 и 40 раз повышено содержание УМО в первый месяц после загрязнения [34].

Однако под действием нефтяного загрязнения почвы в ризосфере растений отмечено увеличение численности фитопатогенных форм микромицетов, снижение численности актиномицетов и целлюлозолитиков [35].

Загрязнение почвы дизельным топливом приводит к снижению численности бактерий р. *Acinetobacter* (с 47% в контроле до 1,3% в загрязнённой почве) [36].

Нефтяное загрязнение оказывает длительное влияние на численность и биомассу почвенных бактерий: эти показатели в почве без загрязнения превышали таковые в нефтезагрязнённых почвах от 12 до 60% [37].

Показано, что численность микромицетов при нефтяном загрязнении повышалась, что указывает на их устойчивость и огромную роль на начальных этапах трансформации нефти [38–40]. Среди мицелиальных грибов наиболее устойчивыми были *Penicillium* и *Aspergillus*, а среди актиномицетов высокой деструктивной активностью по отношению к нефти и НП обладают стрептомицеты и родококки [42–44].

Загрязнение чернозёма нефтью (5–20 л/м²) приводило к изменению структуры доминирования в микробоценозе почвы. По степени увеличения своей численности при загрязнении основные группы МО образовали следующий ряд: актиномицеты > аммонификаторы > спорообразующие бактерии > грибы. При

этом у микромицетов наблюдалось снижение разнообразия, а у бактерий – рост [45].

Под влиянием нефтяного загрязнения в серых лесных почвах Башкортостана и в глееподзолистых почвах Республики Коми происходило накопление условно-патогенных видов грибов [46]. Только в загрязнённой нефтью почве встречались *Dissophora decumbens*, *Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium cladosporioides*, *Penicillium funiculosum*, *Torula convoluta*, *Trichoderma harzianum*, *Mycelia sterilia*. Виды *Aspergillus fumigatus*, *P. funiculosum*, *P. paxilli*, *P. lanosum* устойчивы к антропогенным воздействиям и являются надёжными биоиндикаторами неблагоприятного состояния изучаемого объекта.

В ризосфере растений, произрастающих на нефтезагрязнённой почве, доминировали виды рр. *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium* и *Fusarium* [47]. Основную группу токсинопродуцирующих МО составляли сапрофитные микромицеты, развитие которых стимулируется при таком загрязнении почвы.

В почвах северо-западного региона России выявлено увеличение доли условно-патогенных грибов (по сравнению с фоновой почвой) до 15% в зонах выбросов алюминиевых и медно-никелевых заводов, до 20–25% в почвах, загрязнённых НП [48]. Под воздействием нефтяного загрязнения происходило преобразование структуры комплекса микромицетов и накопление их токсичных видов [49].

Похожее токсическое действие на структуру микробных сообществ оказывают такие поллютанты, как 2,4,6-тринитротолуол [50] и бенз[а]пирен даже в низких концентрациях [51].

Токсическое действие ТМ заключается в снижении общей численности МО, а также аммонификаторов и нитрификаторов. В то же время возрастает численность денитрификаторов, олигонитрификаторов, фосфатрастворяющих и железоредуцирующих бактерий [52].

В модельном эксперименте при выращивании ячменя на урбанозёмах г. Владикавказ, сильно загрязнённых ТМ, показано, что наиболее сильное влияние ТМ оказывают на азотфиксаторы в ризосфере растений [53].

Сильное угнетающее воздействие оказывают ТМ на микробные ферменты, обладающие каталазной, инвертазной и целлюлолитической активностью [54–56].

Загрязнение почвы ТМ приводит к изменению грибных сообществ, что проявляется снижением видового разнообразия. Доминируют виды грибов, толерантных к металлам.

С увеличением влияния техногенного прессинга на агробиоценозы могут произойти изменения в их структуре и активизация паразитического образа жизни у сапрофитных штаммов р. *Fusarium* [57].

При сильной комплексной антропогенной нагрузке преимущество получают виды МО, синтезирующие меланиновые пигменты и токсины широкого спектра действия, что позволяет им выиграть конкурентную борьбу [58].

Для засоленных почв характерно преобладание меланиновых форм микромицетов, наиболее защищённых от действия стресс-фактора, и грибов – продуцентов антибиотиков, которые в присутствии хлорида натрия активно выделяются в ОС [59]. Микробиологический анализ урбанозёмов г. Владикавказ, загрязнённых соединениями меди, свинца, никеля и цинка до опасного и чрезвычайно опасного уровней, показал ярко выраженный эффект меланизации микокомплексов (до 70,9%) [60].

Медь в дозах 150 и 300 мг/кг в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве провоцирует следующие изменения в состоянии микокомплексов: резкое увеличение численности грибных зачатков; усиление фрагментации мицелия, которое сопровождается снижением средней длины фрагментов; стремительную меланизацию грибных популяций [61].

Общая численность грибов-токсинообразователей в антропогенно нарушенных почвах находится в тесной зависимости от перестроек в микробиоценозе, вызванных воздействием загрязнителя. В результате таких перестроек доминирующие позиции в загрязнённых почвах занимают сильные токсинообразователи. Вероятность распространения в таких почвах патогенных и токсиногенных для растений, животных и человека видов достаточно высока [62–64].

Помимо влияния поллютантов, исследованы факторы, которые непосредственно влияют на микробиоту почвы, связанную с инвазивными растениями (химический состав почв, расположение, нарушение почв, местная флора и фауна, наследственные эффекты, аллелопатия, доступность ресурсов). Эти факторы определяют относительное обилие сапрофитов и патогенов, способных ассоциироваться с растением [65].

Взаимодействие растений и МО может помочь инвазивным растениям вытеснить местную флору, используя механизмы, которые включают: опосредованное аллелопатией

подавление местных ризосферных микробов и полезных симбионтов [66], накопление местных патогенов растений в заражённых почвах [67], а также изменения в динамике круговорота питательных веществ, благоприятствующие инвазивному растению [68]. Горчица чесночная (*Allaria petiolate*) продуцирует аллелопатические химические вещества, которые нацелены на полезные микробы, такие как арбускулярно-микоризные симбионты местных растений [66].

Инвазивные растения способны вытеснять местные растения, накапливая в почве большие концентрации фитопатогенных МО. Корневые выделения тропического сорняка хромолена душистой (*Chromolaena odorata*) концентрируют споры *Fusarium* sp. до уровня, в 25 раз превышающего тот, который наблюдается в корневой зоне местных растений без угрозы для хромолемы [67].

На примере аборигенных и инорайонных родственных популяций тростника обыкновенного (*Phragmites australis*) показано, что для них характерны различные сообщества почвенных патогенов независимо от генетического сходства растения-хозяина [69].

Инвазия борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*) изменяет структуру почвенных актиномицетных комплексов. Происходит увеличение родового и видового разнообразия актинобиоты. Отличительная особенность почв под моносообществами борщевика – наличие в комплексе представителей достаточно редкого для дерново-подзолистых почв р. *Streptosporangium* [70]. Кроме того, отмечали на порядок более высокую численность микромицетов под зарослями *H. sosnowskyi* по сравнению с почвой без борщевика, что может быть связано, в том числе, с наличием в ней большего количества экзогенных органических веществ в виде корневых экссудатов борщевика [71]. В других исследованиях в почве под *H. sosnowskyi* доля аскомицетов *Candida variivora* и *Wickerhamomyces anomalus* значительно ниже, а доля дрожжей с высокой гидролитической активностью, таких как *Trichosporon moniliforme* и *T. porosum*, больше [72].

Таким образом, загрязнение почв поллютантами различной природы сопровождается перестройками в структуре микробного комплекса: изменяется численность МО, изменяется спектр доминантных видов и родов, возрастает в комплексе доля микромицетов, синтезирующих меланиновые пигменты, и увеличивается относительное обилие оппортунистических грибов, представляющих

опасность для здоровья человека и животных. В то же время загрязнение почв способствует элиминации из микромицетного комплекса тех видов, которые не устойчивы к ним или не выдерживают конкуренции с более активными оппортунистическими видами [73].

Вклад микроорганизмов ризопланы и ризосферы в защиту растений от действия химических и биологических поллютантов

Совместное существование МО и растений – результат эволюционного приспособления растений оптимизировать свою жизнедеятельность с помощью использования потенциала микробиоты фитосферы. Посредством МО растение способно удовлетворить свои потребности в питательных элементах, витаминах, гормонах. Также положительное влияние проявляется в стимуляции роста и развитии растения, в защите от фитопатогенов, переводе недоступных для растений веществ в более доступные [74].

Среди типичных представителей МО, обладающих биоремедиационными свойствами, выделяются почвенные цианобактерии (ЦБ). Данная группа МО обладает способностью к детоксикации органических поллютантов, биосорбции ТМ, подавлению бактериальных и грибных фитопатогенов, накоплению биологического азота, что приводит к существенному улучшению состояния загрязнённой почвы. При этом на начальных этапах биоремедиационных мероприятий именно ЦБ выступают как чувствительные тест-организмы на неблагоприятное состояние почвы [75–77].

Механизмы борьбы с фитопатогенными МО заключаются, в частности, в конкуренции за экологические ниши и питательные вещества, продуцировании антибиотических веществ [78]. Особое место в этом плане среди ризосферных МО занимают ЦБ, выделяющие в ОС широкий спектр биологически активных веществ (производные алифатических терпенов, терпеновые спирты, эфиры, эфирные масла, альдегиды, летучие кислоты, фенолы, ауксины, антибиотики, алкалоиды, сапонины, фитогормоны), вызывая угнетение популяций особо опасных фитопатогенных грибов р. *Fusarium* [79].

Достаточно хорошо изучено антибиотическое действие веществ, выделяемых представителями бактерий рр. *Pseudomonas*, *Bacillus*, фунгицидное действие микромицетов рода *Trichoderma* [80–86].

Ухудшение экологической обстановки изменяет качественный и количественный состав микробиоты, тем самым приводит к дисбалансу биотических отношений внутри ассоциаций. Известно, что и эпифитная микробиота служит специфическим фактором растительного иммунитета, выстраивая защитный первичный барьер на поверхности вегетативных органов растения, предотвращая попадание внутрь патогенных и условно-патогенных МО [87–89]. Например, *P. herbicola* и *P. fluorenses* способны ингибировать рост возбудителя бактериоза фасоли *Xanthomonas phaseoli* [90].

Из почвы с корней гербарных образцов растений семейства Лютиковые был выделен микромицет *Trichoderma* sp., обладающий высокой антагонистической активностью против фитопатогенных грибов р. *Fusarium* [27, 91].

Ризосфера и ризоплана растений являются неисчерпаемым резервуаром МО с практическими полезными свойствами. По-прежнему актуальны и перспективны исследования ризобактерий, так как в меняющихся экологических условиях важен поиск новых решений, связанных с защитой растительных ресурсов от разрушающих факторов среды.

Использование растительно-микробных комплексов (природных и искусственно сконструированных) в ремедиации загрязнённых почв

Биоремедиация почвы, основанная на метаболическом потенциале живых организмов, эффективна при очистке от загрязнения техногенного происхождения.

Интенсивность протекания процессов биоремедиации определяется тремя основными факторами, зависящими от биологического потенциала живых систем: способностью к деградации поллютантов до нетоксичных либо менее токсичных соединений; возможностью извлекать поллютанты из ОС производить их детоксикацию; способностью ингибировать деятельность организмов-продуцентов токсинов [92].

Именно МО, которые являются редуцентами в круговороте веществ, представляют наибольший интерес как биологические системы, способные к ремедиации техногенно загрязнённых территорий. Наряду с очевидными экологическими и экономическими преимуществами технологии микробной ремедиации, отмечается также и ряд её недостатков, основным из которых является проблема сохране-

ния штаммов-инокулянтов в открытой экосистеме. Следовательно, по-прежнему актуальна задача поддержания их стабильного существования и функционирования при интродукции в почву. Наиболее эффективно использовать для этого растительно-микробные комплексы, так как ризосфера, как естественная экосистема, может обеспечить и высокую численность микробной популяции, и её поддержание [93, 94]. Такого рода ассоциации отличаются высокой адаптивностью к неблагоприятным условиям в силу взаимовыгодного сосуществования [95]. Например, разработаны эффективные биоремедиационные комплексы для очистки почвы от таких поллютантов, как нефть, состоящие из злаковых растений и ассоциаций бактерий *P. plecoglossicida* 2,4-D, *P. hunanensis* IB C7, *P. extremaustralis* IB K2, *Enterobacter asburiae* IB UOM3, а также бактерий *Azospirillum braselense* SR80, продуцирующих индолилуксусную кислоту (ИУК) и являющихся азотфиксаторами [95–96]. Было показано, что эти штаммы при внесении в почву участвовали в деструкции углеводов. При участии растительно-микробных ассоциаций концентрация углеводов в почве за 21 сут снизилась на 45,0–51,2% и 37,5–41,9% при загрязнении нефтью 40 и 80 г/кг соответственно [95]. Ризобактерии, синтезирующие ИУК, используются и при ремедиации почв, загрязнённых ТМ. Синтез ризобактериями ИУК приводит к увеличению потока растительных экссудатов в ризосферу, вследствие чего происходит интенсивное размножение бактерий и бактериальное связывание ТМ в хелатные комплексы [97].

Ремедиацию почвы, загрязнённой ТМ, возможно осуществлять с помощью органических метаболитов микромицетов. Так, при инокулировании почвы сапротрофными микромицетами рр. *Aspergillus* и *Penicillium* выделение щавелевой и лимонной кислоты этими грибами приводило к иммобилизации металлов [98]. При фиторемедиации почвы, загрязнённой кадмием, с использованием базилика (р. *Ocimum*), инокулированного бактериями *Arthrobacter* sp. TISTR 2220 [99], а также при инокуляции люцерны (р. *Medicago*) бактериями *P. aeruginosa* на почве, загрязнённой смесью ТМ, добивались извлечения ТМ из почвы [100].

Для очистки почвы, загрязнённой нефтешламом, использовали растительно-микробные системы: озимая рожь (*Secale cereale* L.) и люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) совместно с ростстимулирующим штаммом *Azospirillum*

brasilense SR80. Использование комбинированного подхода позволило достичь 70%-ной деградации загрязнителя [101].

Одной из проблем современного земледелия является засоление почв. Установлено, что инокуляция растений ризобактериями р. *Azospirillum* значительно смягчает негативный эффект засоления [102].

Ещё одной актуальной проблемой, связанной с деградацией сельскохозяйственных угодий, является возрастание инфекционного фона почвы вследствие снижения разнообразия МО сапротрофного комплекса и накопления фитопатогенов и вредителей. С целью повышения супрессивности почвы в сельском хозяйстве находят широкое применение интродукция экзогенных штаммов, обладающих антагонистической активностью по отношению к фитопатогенам.

В искусственных фитоценозах, например, в лесопитомниках, со временем наблюдается возрастание численности некоторых фитопатогенных и токсинообразующих микромицетов на фоне снижения числа микробов-антагонистов. Отмечается, что инокуляция почвы ряда лесопитомников Красноярского края штаммом *T. viride* значительно повлияла на видовой состав микробиоты за счёт сокращения численности представителей родов *Cladosporium* (в 23,4 раза), *Alternaria* (7,5 раза), а также *Fusarium* (2,3 раза). В то же время, наряду с резким возрастанием популяции *T. viride*, было отмечено повышение численности *Penicillium* spp. Таким образом, инокуляция почвы грибами р. *Trichoderma* вызвала повышение биоразнообразия микромицетов-сапротрофов, что в конечном счёте привело к улучшению фитосанитарного состояния почв лесопитомников [103].

Заключение

Растительно-микробные комплексы, представляющие собой холобионтные сообщества, являются резервуаром огромного количества видов МО, которые можно использовать как источники получения биологически полезных веществ, в качестве антагонистов-фитопатогенов и при биоремедиации почв, загрязнённых поллютантами органической и неорганической природы. Этот процесс неизбежно приводит к росту численности микробов-оппортунистов, фитопатогенов и токсинообразователей, снижающих плодородие почвы и, следовательно, урожайность сельскохозяйственных культур.

На специфику отношений между высшим растением и его микробиомом оказывают влияние абиотические и биотические факторы, включающие тип почв, объём и химический состав выделяемых растением экссудатов, внедрение инвазивных растений, а также развитие фитопатогенов и токсинообразователей.

Одной из актуальных задач современной агробиотехнологии является не только выделение в чистые культуры полезных представителей ризосферной микробиоты, но и создание для этих целей искусственных растительно-микробных комплексов, обогащённых МО антагонистами, ростстимуляторами, деструкторами поллютантов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Minz D., Ofek M., Hadar Y. Plant rhizosphere microbial communities. In: The prokaryotes: prokaryotic communities and ecophysiology / Eds. E. Rosenberg, E.F. DeLong, S. Lory, E. Stacke-Brandt, F. Thompson. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. P. 57–84. doi: 10.1007/978-3-642-30123-0_38
2. Lareen A., Burton B., Schäfer P. Plant root-microbe communication in shaping root microbiomes // Plant Mol Biol. 2016. V. 90. No. 6. P. 575–587. doi: 10.1007/s11103-015-0417-8
3. Haldar S., Sengupta S. Microbial ecology at rhizosphere: bioengineering and future prospective // Plant-microbe interaction: an approach to sustainable agriculture / Eds. D. Choudhary, A. Varma, N. Tuteja. Springer, Singapore, 2016. P. 63–96. doi: 10.1007/978-981-10-2854-0_4
4. Hirsch A. Plant-microbe symbioses: A continuum from commensalism to parasitism // Symbiosis. 2004. No. 37. P. 345–363.
5. Kõiv V., Adamberg K., Adamberg S., Sumeri I., Kasvandik S., Kisand V., Maiväli U., Tenson T. Microbiome of root vegetables – a source of gluten-degrading bacteria // Applied Microbiology and Biotechnology. 2020. V. 104. No. 2. P. 1–15. doi: 10.1007/s00253-020-10852-0
6. Rosenberg E., Zilber-Rosenberg I. Microbes drive evolution of animals and plants: the hologenome concept // mBio. 2016. V. 7. No. 2. Article No. e01395. doi: 10.1128/mBio.01395-15
7. Bordenstein S., Theis K. Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes // PLoS Biol. 2015. V. 13. No. 8. Article No. e1002226. doi: 10.1371/journal.pbio.1002226

8. Guerrero R., Margulis L., Berlanga M. Symbiogenesis: the holobiont as a unit of evolution // *Int. Microbiol.* 2013. V. 16. No. 3. P. 133–143. doi: 10.2436/20.1501.01.188
9. Theis K., Dheilly N., Klassen J., Brucker R., Baines J., Bosch T., Cryan J., Gilbert S., Goodnight C., Lloyd E., Sapp J., Vandenkoornhuysen P., Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E., Bordenstein S. Getting the hologenome concept right: an eco-evolutionary framework for hosts and their microbiomes // *mSystems*. 2016. V. 1. No. 2. Article No. e00028-16. doi: 10.1128/mSystems.00028-16
10. Symbiosis as a source of evolutionary innovation: speciation and morphogenesis / Eds. L. Margulis, R. Foster. Cambridge, Mass. and London: MIT Press, 1991. 454 p.
11. Rosenberg E., Koren O., Reshef L., Efrony R., Zilber-Rosenberg I. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution // *Nat Rev Microbiol.* 2007. No. 5. P. 355–362. doi: 10.1038/nrmicro1635
12. Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution // *FEMS Microbiol Rev.* 2008. No. 32. P. 723–735. doi: 10.1111/j.1574-6976.2008.00123.x
13. Gilbert S. F., Sapp J., Tauber A. I. A symbiotic view of life: we have never been individuals // *Q Rev Biol.* 2012. No. 87. P. 325–341. doi: 10.1086/668166
14. Torsvik V., Øvreås L., Thingstad T. Prokaryotic diversity – magnitude, dynamics, and controlling factors // *Science*. 2002. No. 296. P. 1064–1066. doi: 10.1126/science.1071698
15. Gams W. Biodiversity of soil-inhabiting fungi // *Biodivers. Conserv.* 2007. No. 16. P. 69–72. doi: 10.1007/s10531-006-9124-y
16. Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants // *Annu Rev Plant Biol.* 2013. No. 64. P. 807–838. doi: 10.1146/annurev-arplant-050312-120106
17. Berendsen R., Pieterse C., Bakker P. The rhizosphere microbiome and plant health // *Trends in Plant Science.* 2012. V. 17. No. 8. P. 478–486. doi: 10.1016/j.tplants.2012.04.001
18. Foster RC. Microenvironments of soil microorganisms // *Biol Fertil Soils.* 1988. No. 6. P. 189–203. doi: 10.1007/BF00260816
19. Mendes R., Kruijt M., Bruijn I., Dekkers E., Voort M., Schneider J., Piceno Y., De Santis T., Andersen G., Bakker P., Raaijmakers J. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria // *Science.* 2011. No. 332. P. 1097–1100. doi: 10.1126/science.1203980
20. Bais H., Weir T., Perry L., Gilroy S., Vivanco J. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms // *Annu Rev Plant Biol.* 2006. No. 57. P. 233–266. doi: 10.1146/annurev-arplant.57.032905.105159
21. Doornbos R., Loon L., Bakker P. Impact of root exudates and plant defense signaling on bacterial communities in the rhizosphere. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2012. No. 32. P. 227–243. doi: 10.1007/s13593-011-0028-y
22. Van der Ent S., Van Hulten M., Pozo M., Czechowski T., Udvardi M., Pieterse C., Ton J. Priming of plant innate immunity by rhizobacteria and beta-aminobutyric acid: differences and similarities in regulation // *New Phytol.* 2009. V. 183. No. 2. P. 419–431. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02851.x
23. Tikhonovich I.A., Provorov N.A. Symbioses of plants and microorganisms: molecular genetics of agro-systems of the future. Sankt-Peterburg: St. Petersburg University Press, 2009, 210 p. (in Russian).
24. Genetic basis for the evolution of bacteria – plant symbionts / Eds. N.A. Provorov, I.A. Tikhonovich. Sankt-Peterburg: Inform-Navigator, 2016. 240 p. (in Russian).
25. Shirokikh I.G., Shirokikh A.A., Rodina N.A. Variety specificity of complexes of actinomycetes associated with barley roots on soddy-podzolic soil // *Mikrobiologiya.* 2003. V. 72. No. 4. P. 563–563 (in Russian).
26. Kovina A.L., Domracheva L.I., Malinina A.I. 120-year preservation of the rhizosphere microflora of herbarium specimens of plants of the family Ranunculaceae (Ranunculaceae) // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Kirov: VyatGU, 2018. P. 230–233 (in Russian).
27. Domracheva L.I., Kovina A.L., Malinina A.I., Lyukina A.L. Antimicrobial activity of the micromycete *Trichoderma* sp. isolated from the rhizospheric soil of poisonous ranunculus (*Ranunculus sceleratus*) // *Ecology of the native land: problems and ways to solve them: Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Kirov: VyatGU, 2019. P. 217–219 (in Russian).
28. Ismailov N.M. Influence of oil pollution on the nitrogen cycle in the soil // *Mikrobiologiya.* 1983. V. 52. No. 6. P. 1003–1007 (in Russian).
29. Rybak V.K. Microflora of soil contaminated with oil // *Mikrobiologicheskiy zhurnal.* 1984. No. 4. P. 29–32 (in Russian).
30. Kireeva N.A. Microbiological processes in oil-contaminated soils. Ufa: BGU, 1995. 172 p. (in Russian).
31. Kireeva N.A., Vodopyanov V.V., Miftakhova A.M. Biological activity of oil-contaminated soils. Ufa: Gilem, 2001. 376 p. (in Russian).
32. Babaev E.R. Biodegradation of oil pollution under the effects of hydrocarbon-oxidizing microorganisms // *Oil & Gas Chemistry.* 2019. No. 1. P. 48–51. doi: 10.24411/2310-8266-2019-10109
33. Vodopyanov V.V., Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Yakupova A.B. Influence of oil pollution of soil on rhizosphere microbiota and modeling of hydrocarbon biodegradation processes // *Vestnik OSU.* 2009. No. 6 (100). P. 545–547 (in Russian).

34. Parkhomenko A.N., Stognieva A.A. The use of microbiological indicators to assess the state of soils under anthropogenic impact // Bulletin of the Orenburg State University. 2017. No. 12 (242). P. 90–93 (in Russian).
35. Salakhova G.M. Changes in ecological and physiological parameters of plants and rhizospheric microbiota under conditions of oil pollution and soil reclamation: Abstract of the dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Ufa, 2007. 24 p. (in Russian).
36. Evdokimova G.A. Soil microbiota as a factor in soil resistance to pollution // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 17–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-017-024
37. Nazarov A.V., Ananyina L.N., Yastrebova O.V., Plotnikova E.G. Effect of oil pollution on bacteria in soddy-podzolic soil // Eurasian Soil Sci. 2010. No. 12. P. 1489–1493.
38. Kireeva N.A., Galimzyanova N.F. Influence of oil pollution by oil and oil products on the number and species composition of micromycetes // Pochvovedenie. 1995. No. 3–4. P. 20–27 (in Russian).
39. Kireeva N.A. Microscopic fungi-biodestructors of petroleum hydrocarbons in the soil // Botanical research in the Urals. Information materials. Sverdlovsk, 1990. 41 p. (in Russian).
40. Kuznetsov V.D., Zaitseva T.A., Vakulenko L.V., Filippova S.N. *Streptomyces albiacialis* sp. nov. – a new type of thermo- and holotolerant streptomycete that decomposes oil hydrocarbons // Mikrobiologiya. 1984. V. 53. P. 116–121 (in Russian).
41. Zaborina O.E., Baryshnikova L.M., Baskunov B.P., Golovlyova E.L., Golovlyova L.A. Decomposition of pentachlorophenol in the soil by the introduced strain of *Streptomyces rochei* 303 and activated soil microflora // Microbiology. 1997. No. 5. V. 66. P. 661–666 (in Russian).
42. Zvyagintsev D.G., Guzev V.S., Levin S.V., Oborin A.A. Diagnostic signs of various levels of soil pollution by oil // Pochvovedenie. 1989. No. 1. P. 72–78 (in Russian).
43. Burygin G.L., Kryuchkova E.V., Kargapolova K.Yu., Gogoleva N.E., Safronova V.I., Sigida E.N., Perepelov A.V., Tkachenko O.V., Gogolev Yu.V. Molecular and genetic characteristics of rhizospheric strains of the Lower Volga region promising for agrobiotechnologies // Preservation and enhancement of the genetic resources of microorganisms: Sbornik tezisov Vserossiyskoy shkoly-konferentsii. Moskva: Pero, 2022. P. 52 (in Russian).
44. Elkin A.A., Popov L.A., Ivshina I. B. Hydrocarbon-oxidizing and sulfide-oxidizing activity of *Rhodococcus qingshengii* strain IEGM 1359 // High technologies that determine the quality of life: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Perm: Perm State National Research University, 2018. P. 60–62 (in Russian).
45. Sharkova S.Yu., Polyanskova E.A., Parfenova E.A. The state of the microbial complex of soils under oil pollution // Bulletin of the Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky. Natural Sciences. 2011. No. 25. P. 614–617 (in Russian).
46. Kireeva N.A., Rafkova G.F., Bakayeva M.D. Influence of pollution by oil on accumulations of opportunistic fungi in soil // Problemy meditsinskoy mikologii. 2006. V. 8. No. 3. P. 29–32 (in Russian).
47. Ilarionov S.A., Nazarov A.V., Kalachnikova I.G. The role of micromycetes in the phytotoxicity of crude oil-polluted soils // Russian Journal of Ecology. 2003. V. 34. No. 5. P. 303–308.
48. Korneykova M.V., Lebedeva E.V. Opportunistic fungi in the polluted soils of Kola Peninsula // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. No. 2. P. 125–137. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-2-125-137
49. Donerian L.G., Vodionova M.A., Tarasova Zh.E. Microscopic soil fungi – bioindicators organisms contaminated soil // Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal). 2016. V. 95. No. 9. P. 891–894 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-9-891-894
50. Kormil'tseva I.P., Yakovleva G.Yu., Zakharova N.G., Kurinenko B.M. Community structure mikromitsetov leached chernozem at pollution 2,4,6-trinitrotoluene // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: estestvennye nauki. 2011. V. 153. No. 1. P. 161–167 (in Russian).
51. Yakovleva E.V., Khabibullina F.M., Vinogradova Yu.A., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Microbiological activity of soils contaminated with benzo[a]pyrene // Agrochemistry. 2010. No. 11. P. 63–69 (in Russian).
52. Semenova I.N., Ilbulova G.R., Suyundukov Ya.T. The study of ecological and trophic groups of soil microorganisms in the zone of influence of mining production // Fundamentalnye issledovaniya. 2011. No. 11(2). P. 410–414 (in Russian).
53. Skugoreva S.G., Fokina A.I., Domracheva L.I. Heavy metal toxicity and barley plants, soil and rhizosphere microflora // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 2. P. 32–45 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-2-032-045
54. Evreinova A.V., Popovich A.A., Kolesnikov S.I. The use of indicators of biological activity for monitoring and diagnosing soil pollution with heavy metals of hazard class II // Modern problems of soil pollution: Sbornik mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva, 2004. P. 207–208 (in Russian).
55. Kolesnikov S.I. Ranking of chemical elements according to the degree of their environmental hazard // Modern problems of soil pollution: Sbornik mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva, 2010. P. 362–365 (in Russian).
56. Vodyanitsky Yu.N. Pollution of soils with heavy metals and metalloids and their environmental hazard (analytical review) // Pochvovedenie. 2013. No. 7. P. 872–881 (in Russian).
57. Blagodatskaya E.V., Pampura T.V., Bogomolova I.N. Influence of pollution with lead compounds on the microbiological activity of gray forest soil under a sown meadow // Agrokimiya. 2003. No. 4. P. 74–78 (in Russian).
58. Svistova I.D. Chernozem micromycetes – producers of cellulolytic enzymes / Ed. A.P. Shcherbakov. Voronezh: Izdatelstvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2003. 151 p. (in Russian).

59. Artamonova V.S., Ditz L.Yu., Elizarova T.N., Lyutykh I.V. Technogenic salinization of soils and their microbiological characteristics // Siberian Ecological Journal. 2010. V. 17. No. 3. P. 461–470 (in Russian).
60. Fokina A.I., Domracheva L.I., Olkova A.S., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Berezin G.I., Darovskikh L.V. Research the samples toxicity of urbanozems, polluted by heavy metals // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2016. V. 18. No. 2 (2). P. 544–550 (in Russian).
61. Domracheva L.I., Gornostaeva E.A. Reaction of algal-cyanobacterial complexes to increasing concentrations of copper ions in the soil under various agricultural crops // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-044-050
62. Marfenina O.E. Anthropogenic changes in complexes of microscopic fungi in soils: Abstract of the thesis. diss. doc. biol. sciences. Moskva: MGU, 1999. 48 p. (in Russian).
63. Mosina L.V., Dovletyarova E.A., Efremova S.Yu., Norvosuren Zh. Ecological danger of soil pollution with heavy metals (for example, lead) // Proceedings of PSPU im. V.G. Belinsky. 2012. No. 29. P. 383–386 (in Russian).
64. Bagaeva T.V., Ionova N.E., Nadeeva G.V. Microbiological remediation of natural systems from heavy metals. Kazan: Kazan University, 2013. 56 p. (in Russian).
65. Coats V.C., Rumpho M.E. The rhizosphere microbiota of plant invaders: an overview of recent advances in the microbiomics of invasive plants // Front. Microbiol. 2014. V. 5. Article No. 368. doi: 10.3389/fmicb.2014.00368
66. Callaway R.M., Cipollini D., Barto K., Thelen G.C., Hallett S.G., Prati D., Stinson K., Klironomos J. Novel weapons: invasive plant suppresses fungal mutualists in America but not in its native Europe // Ecology. 2008. V. 89. P. 1043–1055. doi: 10.1890/07-0370.1
67. Mangla S., Callaway R.M. Exotic invasive plant accumulates native soil pathogens which inhibit native plants // J. Ecol. 2008. V. 96. P. 58–67. doi: 10.1111/j.1365-2745.2007.01312.x
68. Laungani R., Knops J.M.H. Species-driven changes in nitrogen cycling can provide a mechanism for plant invasions // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2009. V. 106. P. 12400–12405. doi: 10.1073/pnas.0900921106
69. Nelson E.B., Karp M.A. Soil pathogen communities associated with native and non-native *Phragmites australis* populations in freshwater wetlands // Ecol. Evol. 2013. V. 3. P. 5254–5267. doi: 10.1002/ece3.900
70. Tovstik E.V., Shirokikh I.G., Soloveva E.S., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The change in soil actinobiote under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 4. P. 114–118 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-114-118
71. Tovstik E.V., Shirokikh A.A., Shirokikh I.G. Microbiological state of soils under invasive thickets of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) // Vestnik sovremennykh issledovaniy. 2018. No. 2 (17). P. 5–8 (in Russian).
72. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Chernov I.Y. Soil yeast communities under the aggressive invasion of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) // Eurasian Soil Sc. 2015. V. 48. P. 201–207. doi: 10.1134/S1064229315020040
73. Shirokikh A.A., Shirokikh I.G., Ustyuzhanin I.A., Kolupaev A.V. Microscopic fungi in urban soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 39–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-039-044
74. Dobrovolskaya T.G. Structure of bacterial communities in soils. Moskva: Academ-kniga, 2002. 282 p. (in Russian).
75. Tikhonovich I.A., Kozhemyakov A.P., Chebotar V.K., Kruglov Yu.V., Kandybin N.V., Laptev G.Yu. Biopreparations in agriculture. Methodology and practice of the use of microorganisms in crop and fodder production. Moskva: VNIISKhM, 2005. 154 p. (in Russian).
76. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Popov L.B., Zykova Yu.N. Bioremediation possibilities of soil cyanobacteria (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 1. P. 8–17 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-1-008-017
77. Fokina A.I., Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Trushnikov P.A. Cyanobacteria *Nostoc paludosum* as test organisms, producers of biologically active substances and sorbents of heavy metals // Cyanoprokaryotes/cyanobacteria: systematics, ecology, distribution: Materialy dokladov II Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly-konferentsii. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Scientific Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019. P. 276–278 (in Russian).
78. Migunova V.D., Ryabchenko N.F., Konrat A.N. Influence of antagonistic bacteria on the defeat of tomato plants by fusarium // Teoriya i praktika borby s parazitarnymi boleznyami. 2015. No. 16. P. 261–262 (in Russian).
79. Domracheva L.I., Trefilova L.V., Vetluzhskikh I.L. Cyanobacterial inhibition of Fusarium infections // Problems of ecology and nature management in the agricultural sector. Moskva: ANK, 2003. P. 236–240 (in Russian).
80. Trefilova L.V. The use of cyanobacteria in agricultural biotechnology: Abstract of the thesis. dis. cand. biol. sciences. Saratov, 2008. 25 p. (in Russian).
81. Boronin A.M. Rhizospheric bacteria of the genus *Pseudomonas*, contributing to the growth and development of plants // Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal. 1998. No. 10. P. 25–31 (in Russian).
82. Kalacheva A.E., Lagodich O.V. Protective effect of *Pseudomonas aurantiaca* B-162 and *Pseudomonas putida* KMBU 4308 against gray rot // Modern trends in agriculture: III Mezhdunarodnaya nauchnaya Internet-konferentsiya. Kazan: Sinyayev Dmitry Nikolaevich, 2014. P. 46–48 (in Russian).

83. Bais H.P., Fall R., Vivanco J.M. Biocontrol of *Bacillus subtilis* against infection of Arabidopsis roots by *Pseudomonas syringae* is facilitated by biofilm formation and surfactin production // *Plant Physiol.* 2004. V. 134. P. 307–319. doi: 10.1104/pp.103.028712
84. Snopková K., Dufková K., Šmajš D. *Pseudomonas prosekii* isolated in Antarctica inhibits plant-pathogenic strains of *Pseudomonas viridiflava* and *Pseudomonas fluorescens* // *Czech Polar Reports.* 2021. V. 11. No. 2. P. 270–278. doi: 10.5817/CPR2021-2-18
85. Minnullina L.F., Khadieva G.F. New strains of *Bacillus subtilis* suitable for use as biological products // *Fanny Tatarstan.* 2017. No. 2. P. 115–120 (in Russian).
86. Balbashevskaya N.A., Ogarkov B.N. Antagonistic properties of fungi of the genus *Trichoderma* in relation to some phytopathogenic fungi // *Vestnik Irkutskogo Universiteta.* 2004. No. S. P. 3–4 (in Russian).
87. Naplekova N.N., Kostyukov I.O. Influence of environmental factors on the microflora of the phyllosphere of *Calendula officinalis* // *Vestnik NSAU (Novosibirsk State Agrarian University).* 2005. No. 2 (3). P. 85–91 (in Russian).
88. Boguslavskaya N.V. Epiphytic microflora – an indicator of the ecological situation in agrocenoses // *Ekologicheskaya bezopasnost v APK. Referativnyy zhurnal.* 2008. No. 4. P. 880 (in Russian).
89. Selikhova A.A. Epiphytic microflora of plants as a specific factor of plant immunity // *Molodoy uchenyy.* 2019. No. 51 (289). P. 280–282 (in Russian).
90. Sirotin A.A., Zelenkova V.N., Shkuropat M.N., Kortuykova E.A. Study of the epiphytic microflora of some vegetable crops // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy.* 2016. No. 7. P. 230–232 (in Russian).
91. Domracheva L.I., Kovina A.L., Simakova V.S., Berg A.A. Herbarium samples of brown algae and *Nostoc commune* biofilms as carriers of microflora // *Ecology of the native land: problems and solutions: Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Book. 2. Kirov: VyatGU, 2018. P. 27–29 (in Russian).
92. Domracheva L.I. The use of organisms and bio-systems in the remediation of territories // *Theoretical and Applied Ecology.* 2009. No. 4. P. 4–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2009-4-004-016
93. Yankevich M.I., Khadeeva V.V., Murygina V.P. Bioremediation of soils: yesterday, today, tomorrow // *Biosfera.* 2015. No. 2. P. 199–208 (in Russian).
94. Belimov A.A., Zinovkina N.Yu., Safronova V.I., Semenova E.V., Vishnyakova M.A., Pilyuzza G.Z., Bulitta S. Problems of using symbiotic plant-microbial systems for bioremediation metal-contaminated soils // *Strategy of interaction of microorganisms and plants with the environment.* Saratov: Nauchnaya kniga, 2010. P. 7 (in Russian).
95. Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Vysotskaya L.B., Arkhipova T.N., Akhtyamova Z.A., Chetverikov S.P., Loginov O.N. The use of auxin-producing bacteria in phytoremediation of oil-contaminated soil // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 1. P. 144–150 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2020-1-144-150
96. 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 the consequences of oil pollution (review) // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya.* 2019. V. 55. No. 4. P. 338–349 (in Russian).
97. Pishchik V.N., Vorobyov N.I., Provorov N.A., Khomyakov Yu.V. Mechanisms of adaptation of plants and microorganisms in plant-microbial systems to heavy metals // *Mikrobiologiya.* 2016. V. 85. No. 3. P. 231–247 (in Russian).
98. Arwidsson Z., Elgh-Dalgren K., von Kronhelm T., Sjöberg R., Allard B., van Hees P. Remediation of heavy metal contaminated soil washing residues with amino polycarboxylic acids // *J. Hazard Mater.* 2010. V. 173. No. 1–3. P. 697–704. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.141
99. Prapadgee B., Khonsue N. Bacterial-assisted cadmium phytoremediation by *Ocimum gratissimum* L. in polluted agricultural soil: a field trial experiment // *Int. J. Env. Sci. Tech.* 2015. V. 12. P. 3843–3852. doi: 10.1007/s13762-015-0816-z
100. 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
101. Muratova A.Yu., Bondarenkova A.D., Panchenko L.V., Turkovskaya O.V. The use of complex phytoremediation for cleaning soil contaminated with oil sludge // *Biotehnologiya.* 2010. No. 1. P. 77–84 (in Russian).
102. Barassi C.A., Ayrault G., Creus C.M., Sueldo R.J., Sobrero M.T. Seed inoculation with *Azospirillum* mitigates NaCl effects on lettuce // *Scientia Horticulturae.* 2006. V. 109. No. 1. P. 8–14. doi: 10.1016/j.scienta.02.025
103. Kondakova O.E. Microbiological bioremediation of forest nursery soils and protection of coniferous seedlings from infectious diseases // *Prospect Svobodny-2015: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh.* Krasnoyarsk: Sibirskiy federalnyy universitet, 2015. P. 46–50 (in Russian).

Оценка фотопротекторного действия терпенофенолов при защите полилактида от УФ-С излучения

© 2022. В. А. Белый, к. х. н., в. н. с., И. М. Кузиванов, к. х. н., н. с.,
И. В. Федорова, к. х. н., н. с., Е. У. Ипатова, н. с.,
И. Ю. Чукичева, д. х. н., г. н. с., А. В. Кучин, д. х. н., зав. лабораторией,
Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48,
e-mail: skeyling@yandex.ru

Полилактид (ПЛА) является одним из наиболее перспективных с экологической точки зрения полимерных материалов для замены полимеров на основе ископаемого сырья. В данной работе выявлены спектрометрические критерии, позволяющие количественно, на основе анализа инфракрасных (ИК) спектров, оценивать эффективность новых фотостабилизаторов при предотвращении фотодеструкции ПЛА под действием УФ-С излучения. Предложена методика, включающая в себя облучение образцов ПЛА с фотостабилизатором излучением с длиной волны 254 нм в течение 4 ч и расчёт эффективности действия фотостабилизатора на основании ИК-спектрометрических данных.

Изучена зависимость фотопротекторной активности терпенофенолов и бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)-себацата от процентного содержания фотостабилизатора в образцах ПЛА. Наилучшую защиту полилактида от УФ-С излучения показал 4-метил-2,6-диизоборнилфенол, массовая доля которого в образце ПЛА составляла 0,05%. Его фотопротекторная активность оказалась почти в 2 раза лучше, чем у бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацата той же концентрации. Сильное фотосенсибилизирующее действие, ускоряющее фотодеструкцию ПЛА, проявилось у 2-изоборнил-4-метилфенола и 2-изоборнил-6-метилфенола, когда их массовые доли в полимере составляли 1%.

Ключевые слова: возобновляемые источники сырья, полилактид, фотопротекторы, инфракрасная спектрометрия.

Photoprotection properties of terpenophenols in polylactide against UVC radiation

© 2022. V. A. Belyy ORCID: 0000-0001-5410-9587, I. M. Kuzivanov ORCID: 0000-0002-5189-7175,
I. V. Fedorova ORCID: 0000-0002-4423-8235, E. U. Ipatova ORCID: 0000-0001-9955-0835,
I. Yu. Chukicheva ORCID: 0000-0002-7346-0812, A. V. Kuchin ORCID: 0000-0003-4322-7961,
Institute of Chemistry of FRC Komi SC UB RAS,
48, Pervomaiskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000,
e-mail: skeyling@yandex.ru

Poly lactide is one of the most environmentally friendly polymers to replace fossil-based materials. In this work we quantitatively evaluated the effectiveness of new photostabilizers in preventing the photodegradation of polylactide under UVC radiation by using the spectrometric criteria calculated from FTIR spectra. We have proposed a method including a treatment of the samples of polylactide mixed with the photostabilizers by the UV radiation with a wavelength of 254 nm for 4 hours followed by the calculation of the effectiveness of the photostabilizer based on the FTIR spectrometric data. The number of terminal hydroxyl groups increased during photodegradation due to the cleavage of ester bonds in the polymer, this caused the increase of the absorption at 3600–3100 cm^{-1} in the FTIR spectra. Several photostabilizers of the terpenophenol class were studied, namely 4-methyl-2,6-diisobornylphenol, 2-isobornylphenol, 2-isobornyl-4-methylphenol and 2-isobornyl-6-methylphenol, as well as bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidyl)sebacate – the well-known hindered amine light stabilizer. The mass concentrations of these photostabilizers varied from 0.05 to 1.00%.

The best protection effect from the UVC radiation in regard to polylactide was shown by 4-methyl-2,6-diisobornylphenol at the concentration of 0.05% by weight. Its photoprotective activity was almost 2 times higher than that of bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidyl)sebacate of the same concentration. The high photoprotecting activity of 4-methyl-2,6-diisobornylphenol was due to the increased stability of the phenoxy radical provided by bulky isobornyl substituents in the aromatic ring. In the opposite, the strong photosensitizing effect accelerat-

ing the photodegradation of polylactide was manifested by 1% concentrations of 2-isobornyl-4-methylphenol and 2-isobornyl-6-methylphenol. In this case, the delocalization of the unpaired electron in the conjugation chain with the formation of many resonance forms contributed to the transfer of the radical to polylactide macromolecules. The protection of polylactide from UVC radiation opens up prospects for expanding the areas of application of polylactide, a polymer synthesized from renewable raw materials.

Keywords: renewable raw materials, polylactide, photoprotectors, infrared spectrometry.

Стремление к устойчивому развитию полимерной промышленности вызвано тем, чтобы найти способы сохранить ресурсы Земли для будущих поколений и уменьшить вредные последствия загрязнения окружающей среды полимерным мусором. Утилизация полимерных отходов путями механической переработки и мусоросжигания сопряжена с существенными экологическими ограничениями [1–3]. На рынках и в производстве пластмасс следование современному тренду будет означать отказ от ископаемых источников сырья для синтеза полимеров и переход к возобновляемым источникам, таким как растения, а также активное использование вторичного сырья. Полилактид (ПЛА) – это алифатический полимер молочной кислоты, получаемой путём ферментативной переработки растительного сырья. Этот полимер стал сейчас широко востребован в качестве упаковочного материала, в 3D печати, а также в медицине. Биосовместимость, термопластичность и обширная растительная сырьевая база делают его перспективной альтернативой полимеров на основе ископаемого сырья [4, 5]. В большей части направлений использования полимеров, в том числе ПЛА, требуется введение модифицирующих добавок для улучшения определённых свойств. Серьёзным недостатком ПЛА, требующим применения специальных добавок, является его плохая стойкость к разрушению под действием УФ-излучения, что снижает защитные функции ПЛА при использовании в качестве упаковки, снижает срок службы изделий, используемых в медицинской сфере [6].

Коротковолновое излучение в диапазоне длин волн 100–280 нм (УФ-С) является наиболее разрушительным типом УФ-излучения для полимерных изделий. Озон в верхних слоях атмосферы поглощает солнечное УФ-излучение, но по мере того, как озоновый слой становится тоньше вследствие экологических проблем, защитная фильтрующая способность атмосферы постепенно снижается. Уже сейчас исследования показывают, что интенсивность УФ-С при 245 нм, проникающего к поверхности Земли, достигает 2,54 мВт/см² в некоторых регионах, что может вызывать эритему на

светлой коже человека уже после нескольких секунд облучения. Что же касается полимеров, то данная интенсивность УФ-С приводит к снижению молекулярной массы ПЛА более чем в 4 раза после 24 ч облучения [7, 8]. Поэтому не снижается научный интерес к разработке новых термо- и фотостабилизаторов полимеров, способных продлить срок службы изделий и сохранить эксплуатационные характеристики полимеров при вторичном использовании [9, 10].

В данной работе были смоделированы условия воздействия УФ-С с длиной волны 254 нм на ПЛА с новыми добавками, впервые тестируемыми в качестве фотостабилизаторов. Анализ литературных данных выявил перспективный класс антиоксидантов – орто-алкилированных фенолов с изоборнилным заместителем [11–15] (рис. 1 (1–4)). Было проведено исследование влияния особенностей их структуры на активность и сравнение действия новых стабилизаторов с широко используемым фотостабилизатором полимеров – бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)-себацатом (рис. 1 (5)).

Цель работы состояла в сравнительном исследовании фотопротекторной активности ряда орто-алкилированных фенолов по отношению к ПЛА путём количественных измерений изменений интенсивности поглощения на ИК-спектрах полимера в области 3600–3100 см⁻¹ после облучения излучением УФ-С диапазона.

Объекты и методы исследования

В исследовании был использован ПЛА Ingeo™ Biopolymer 4043D производства Naturalworks (США). Навеску полимера массой 1,3 г растворяли в 15 мл дихлорметана. По 1 мл полученного раствора наносили на предварительно взвешенную подложку из стекла размерами 25,4 × 76,2 мм. Далее образец подвергали сушке при 60 °С в течение 2 ч. После сушки пластину с образцом взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг. В качестве фотостабилизаторов были исследованы вещества (1–5), структурные формулы которых представлены на рисунке 1. Для

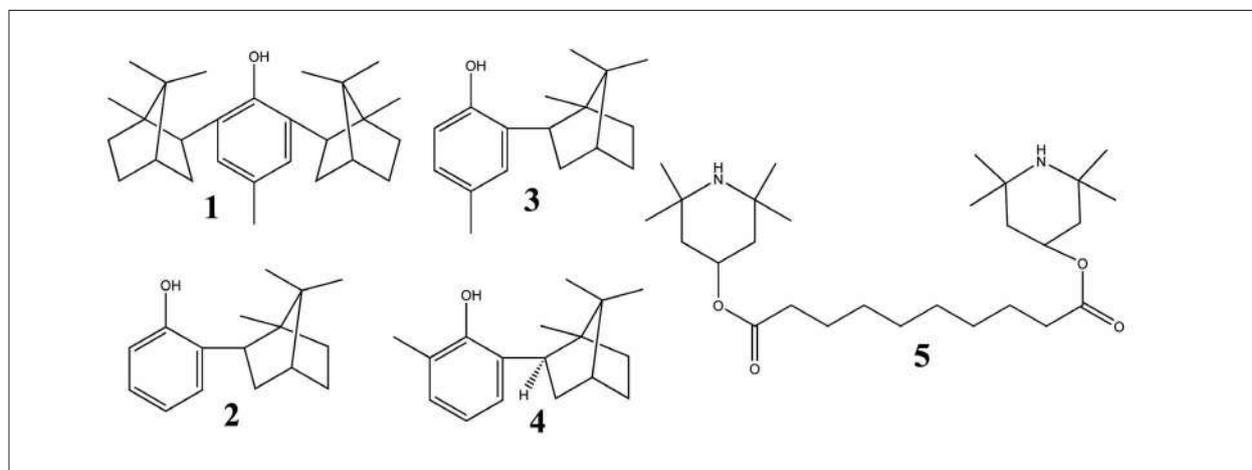


Рис. 1. Фотостабилизаторы полилактида: 1 – 4-метил-2,6-диизоборнилфенол; 2 – 2-изоборнилфенол; 3 – 2-изоборнил-4-метилфенол; 4 – 2-изоборнил-6-метилфенол; 5 – бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацат
Fig. 1. Polylactide photostabilizers: 1 – 4-methyl-2,6-diisobornylphenol; 2 – 2-isobornylphenol; 3 – 2-isobornyl-4-methylphenol; 4 – 2-isobornyl-6-methylphenol; 5 – bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidyl) sebacate

приготовления образцов ПЛА с определённой массовой долей фотостабилизатора рассчитанную навеску фотостабилизатора растворяли совместно с навеской ПЛА в 15 мл дихлорметана. Методика апробирована при массовых концентрациях 0,05; 0,1; 0,5 и 1% фотостабилизаторов (1–5) в ПЛА.

Экспериментальная установка для облучения полимерных образцов представляла собой металлическую камеру размерами 300 × 160 × 400 мм с источником излучения внутри – кварцевой лампой 254 нм мощностью 25 Вт, температура 29 °С. Расстояние между облучаемым образцом и источником излучения составляло 40 мм. Пластины с образцами ПЛА помещали в экспериментальную установку облучения на соответствующее время (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 или 8 ч). По истечении заданного времени облучения производили взвешивание пластинок для контроля потери массы образца. Каждый эксперимент повторяли трижды.

Инфракрасную Фурье-спектроскопию исходных и облучённых образцов ПЛА проводили на ИК-Фурье-спектрометре IR Prestige-21 (Shimadzu), оснащённом детектором DLATGS, чтобы анализировать изменения функциональных групп и связей, вызванными УФ-С облучением. Спектры регистрировали в диапазоне 4000–700 см⁻¹ при разрешении 4 см⁻¹, количество сканирований для каждого образца – 20. Спектры пропускания получены в режиме диффузного отражения. Данные обрабатывали с помощью программного обеспе-

чения Shimadzu. Спектры были количественно интегрированы в Origin 6.0.

Эффективность фотостабилизации (PSA, %) оценивали по изменениям в ИК-спектре облучённого образца ПЛА с фотостабилизатором по сравнению с ИК-спектрами исходного не облучённого образца и облучённого образца ПЛА без добавления фотостабилизатора по следующему уравнению:

$$PSA = 100 - \frac{(I_{PS} - I_{raw}) \cdot 100}{I_{UV} - I_{raw}}$$

где I_{PS} – относительная интегральная интенсивность поглощения в области 3600–3100 см⁻¹ на спектре облучённого ПЛА с добавкой фотопротектора, I_{raw} – относительная интегральная интенсивность поглощения в области 3600–3100 см⁻¹ на спектре не облучённого ПЛА без добавки фотопротектора, I_{UV} – относительная интегральная интенсивность поглощения в области 3600–3100 см⁻¹ на спектре облучённого ПЛА без добавки фотопротектора. В качестве результата расчёта принимали среднюю величину по результатам повторных экспериментов. Обработку результатов всех экспериментов проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011.

Результаты и обсуждение

Воздействие излучения в УФ-С диапазоне спектра на ПЛА без добавок стабилизатора в течение 8 ч приводило к существенным изменениям его свойств и внешнего вида. Об-

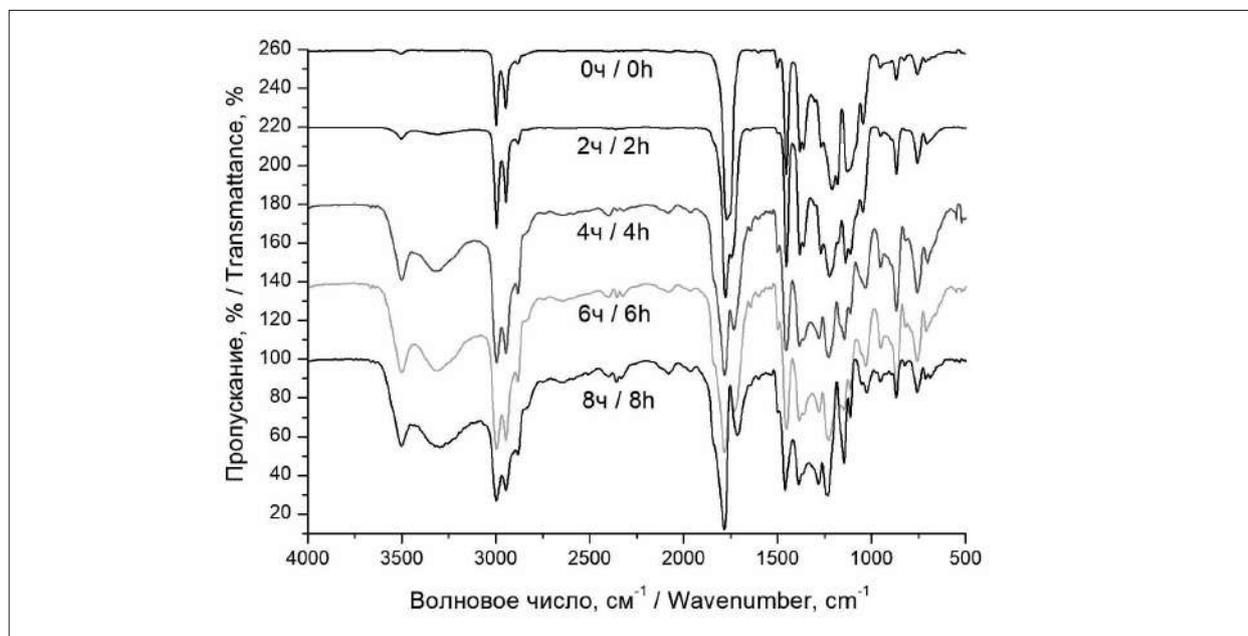


Рис. 2. ИК-спектры образцов ПЛА с разной продолжительностью облучения УФ-С в интервале 0–8 ч
 Fig. 2. FTIR spectra of PLA after 0–8 hours of UV-C irradiation

Таблица / Table

Отнесение полос поглощения на ИК-спектрах полилактида
 Assignment of absorption bands in FTIR spectra of polylactid

Волновое число, см ⁻¹ / Wave number, cm ⁻¹	Отнесение полосы / Band assignment
3600–3100	валентные колебания –ОН stretch vibrations –ОН
2995,4; 2945,3	валентные колебания –СН– stretch vibrations –СН–
1774,5	валентные колебания –С=О stretch vibrations –С=О
1454,3	деформационные колебания –СН ₃ deformation –СН ₃
1382,9; 1361,7	деформационные колебания –СН– deformation –СН–
1217,1	деформационные колебания –С=О deformation –С=О
1183,4; 1136,1; 1114,9	валентные колебания –С–О– stretch vibrations –С–О–
1047,4	деформационные колебания –ОН deformation –ОН
952,8; 868,0	валентные колебания –С–С– stretch vibrations –С–С–

разцы темнели и приобретали повышенную хрупкость. Изменения в химической структуре полимера становились очевидными при сравнении ИК-спектров образцов ПЛА, отбираемых для анализа в ходе облучения с интервалом в 1 ч со спектром исходного ПЛА (рис. 2). В таблице представлено отнесение полос поглощения на ИК-спектрах образцов ПЛА.

Концевые гидроксильные группы исходного полимера до начала облучения

демонстрировали сравнительно небольшой пик поглощения при 3500 см⁻¹. Однако с увеличением времени фотоокислительной деструкции, всё большее количество сложноэфирных связей в полимерной цепи разрывалось и, как следствие, росло количество концевых гидроксильных и карбоксильных групп. При этом поглощение в области ИК-спектра 3600–3100 см⁻¹ значительно возрастало. Диапазон поглощения на ИК-спектрах

1200–1000 cm^{-1} , напротив, демонстрировал снижение интенсивности поглощения. Это было связано со снижением числа эфирных связей между мономерными звеньями ПЛА и косвенно свидетельствует о снижении молекулярной массы полимера.

УФ-деградация ПЛА приводила к образованию новых полос поглощения: уже на ИК-спектре после 2-х часовой обработки можно увидеть появление полосы 1712,8 cm^{-1} , соответствующей валентным колебаниям $\text{C}=\text{O}$ карбоксильных групп и слабой полосы с максимумом при 1843 cm^{-1} , приписываемой ангидридным группам [16].

Отношения интегральных интенсивностей областей ИК-спектра 3600–3100 и 1200–1000 cm^{-1} (A_m) к общей интегральной интенсивности ИК-спектра (A_w) для каждого временного интервала облучения (0–8 ч) образуют зависимости (рис. 3 (а) и (b)), количественно отражающие процессы фотодеструкции, проходящие в химической структуре полимера.

Судя по рисунку 3 (а), надёжные и воспроизводимые признаки фотодеструкции регистрируется уже через 4 ч облучения. Зависимости относительной интегральной интенсивности от продолжительности облучения были аппроксимированы полиномом 3-й степени. Причём на основании интегрирования диапазона спектра, характерного для гидроксиль-

ных групп, (3600–3100 cm^{-1}) коэффициент детерминации ($R^2 = 0,9724$) оказался выше, чем для кривой по области полос поглощения эфирных связей ($R^2 = 0,9335$).

Известно, что УФ-излучение в диапазоне 220–280 нм поглощается карбонильной группой ПЛА и вызывает $n\text{-}\pi^*$ -электронный переход. Это возбужденное состояние электрона способно индуцировать реакцию разрыва макромолекулярной цепи по механизму Норриша II типа (рис. 4) [4]. Итогом этой реакции становится появление новых гидроксильных и аллильных групп.

Фотостабилизаторы (1–4) (рис. 1) относятся к УФ-стабилизаторам полимеров класса стерически затруднённых фенолов, а бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацат (рис. 1 (5)) – это светостабилизатор на основе сложнозамещённых аминов (HALS). Для стерически затруднённых фенолов, таких как вещества 1–4, предполагается, что на первой стадии стабилизации атом водорода фенольной группы переходит к радикальным частицам, возникающим в полимере. На втором этапе происходит отдача атома водорода в α -положении, что приводит к образованию хинонной структуры [11].

Считается, что фотостабилизирующая способность HALS, таких как бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацат (рис. 1 (5)), основана на образовании нитроксильных

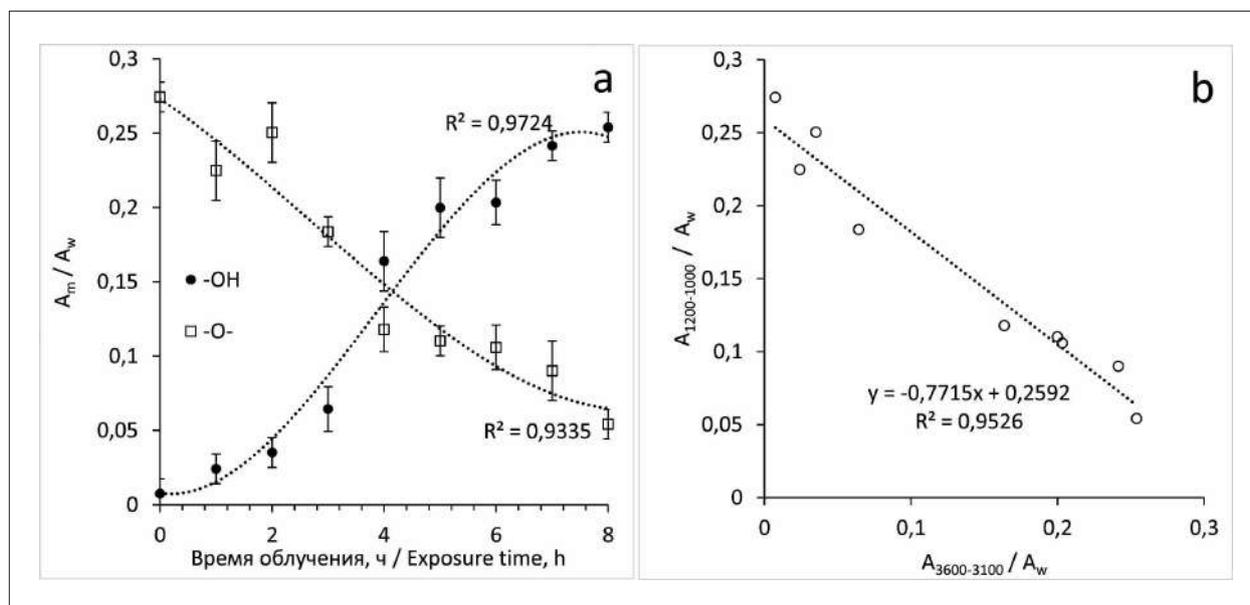


Рис. 3. Зависимости относительной интегральной интенсивности поглощения полилактида при 3600–3100 и 1200–1000 cm^{-1} от продолжительности облучения (0–8 ч) (а) и корреляция показателей относительных интегральных интенсивностей поглощения при 3600–3100 и 1200–1000 cm^{-1} (b)

Fig. 3. Dependences of the relative integrated FTIR absorption of polylactide at 3600–3100 and 1200–1000 cm^{-1} on irradiation time (0–8 h) (a) and correlation of the relative integrated FTIR absorption at 3600–3100 and 1200–1000 cm^{-1} (b)

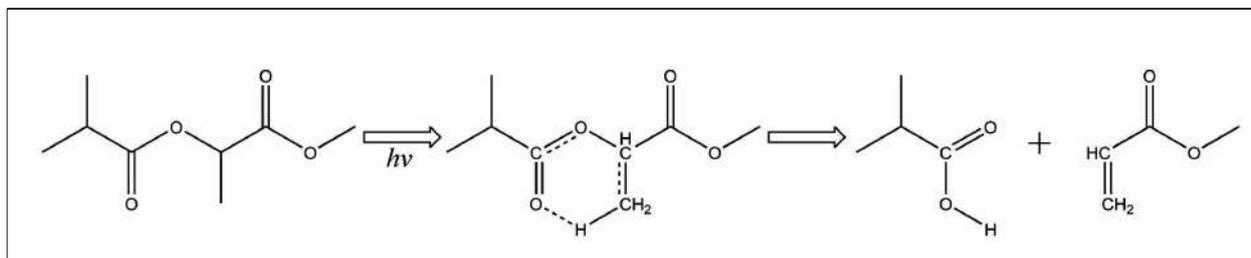


Рис. 4. Реакция фотодеградации полилактида по механизму Норриша II типа [4]
 Fig. 4. Photodegradation of polylactide according to the Norrish type II mechanism [4]

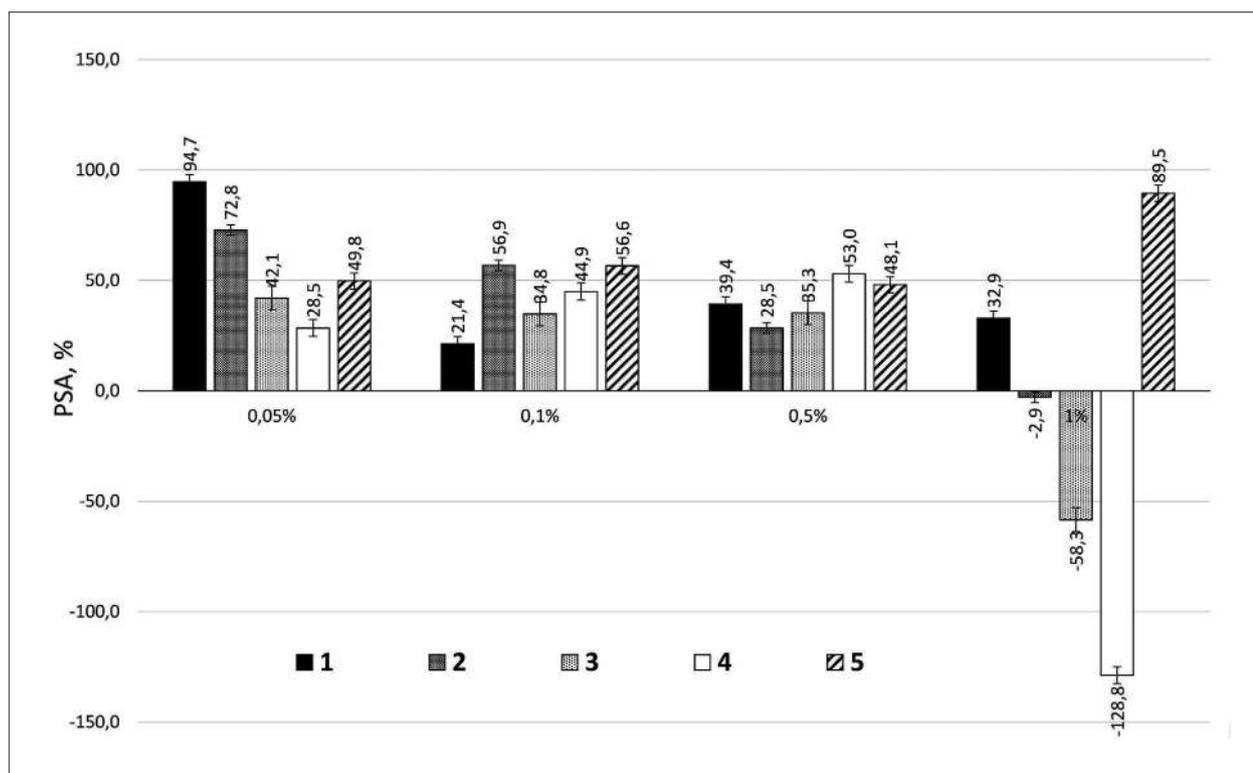


Рис. 5. Фотостабилизирующая активность (PSA, %) терпенофенолов (1–4) и бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацата (5) в концентрациях 0,05; 0,1; 0,5 и 1 масс. % по отношению к полилактиду
 Fig. 5. Photostabilizing activity (PSA, %) of 0.05, 0.1, 0.5 and 1% wt. concentrations of the terpenophenols (1–4) and bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidyl)sebacate (5) in relation to polylactide

радикалов под действием излучения, которые способны вступать в реакцию рекомбинации с полимерным радикалом и, следовательно, прерывать деструктивные процессы в полимерной цепи [9].

Рисунок 5 позволяет произвести сравнение эффективности фотопротекторного действия изученных веществ. Наилучшую защиту ПЛА от УФ-С излучения показал 4-метил-2,6-диизоборнилфенол (1) при массовой доле 0,05% образце: его коэффициент PSA почти в два раза превосходит этот показатель бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацата (5). В ряду исследуемых терпенофенолов, массовая доля 0,05% оказалась оптимальной для веществ 1–3, но показывала снижение

при использовании больших концентраций (0,1–1%). Для 2-изоборнил-6-метилфенола (рис. 1 (4)) оптимальной концентрацией являлась концентрация 0,5% в образце полимера. Однако использование терпенофенолов (2–4) в концентрации 1% от массы полимерного образца приводило не только к снижению их фотопротекторного действия по отношению к полимерной матрице ПЛА, но и проявлению фотосенсибилизирующего эффекта, проявляющегося в ускорении деструктивных процессов в полимере. Например, терпенофенол (4) приводил к степени деградации ПЛА более чем в два раза превышающей этот показатель у образца сравнения после 4 ч облучения. Эффективность фотостабилизатора (5) менее

зависима от концентрации в её диапазоне 0,05–0,5% от массы полимерного образца. Повышение концентрации до 1% приводит к увеличению защитного действия вещества (5) в условиях облучения полилактида излучением УФ-С.

Применяемая методика оценки фотопротекторного действия полимерных добавок класса терпенофенолов позволила сравнить вклад особенностей их химической структуры. В структурах (2–4) (рис. 1) вероятна стабилизация феноксильного радикала за счёт делокализации неспаренного электрона в цепочке сопряжения с образованием множества резонансных форм, но это способствует передаче радикала на макромолекулы ПЛА [17], что становится заметно при повышении концентрации. Высокая фотостабилизирующая активность терпенофенола (1) вызвана повышенной стабильностью феноксильного радикала, обеспечиваемой за счёт объёмных изоборнилных заместителей во 2-м и 6-м положениях ароматического кольца [18].

Заключение

Продление срока службы пластиковых изделий из ПЛА в условиях воздействия агрессивного УФ-С излучения открывает перспективы расширения областей применения ПЛА – полимера, синтезируемого на основе возобновляемых растительных сырьевых источников. В данной работе выявлены спектрометрические критерии, позволяющие количественно на основе анализа ИК-спектров оценивать эффективность новых фотостабилизаторов при предотвращении фотодеструкции ПЛА под действием УФ-С излучения. Оценка основывалась на методике, включающей в себя облучение образцов ПЛА с фотостабилизатором излучением с длиной волны 254 нм в течение 4 ч и расчёт эффективности действия фотостабилизатора на основании ИК-спектрометрических данных. Изучен ряд фотостабилизаторов класса терпенофенолов при использовании их в различных массовых соотношениях с полимером, а также фотостабилизатора бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацата. Наилучшую защиту ПЛА от УФ-С излучения показал 4-метил-2,6-диизоборнилфенол в концентрации 0,05% от массы полимерного образца. Его фотопротекторная активность оказалась почти в 2 раза лучше, чем у бис(2,2,6,6-тетраметил-4-пиперидил)себацата той же концентрации. Сильное фотосенсибилизирующее дей-

ствие, ускоряющее фотодеструкцию ПЛА, проявилось у 2-изоборнил-4-метилфенола и 2-изоборнил-6-метилфенола в концентрациях 1% от массы полимерного образца.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-23-00466, <https://rscf.ru/project/22-23-00466/>.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Химия» ИХ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

References

1. Kochurov B.I., Blinova E.A. Assessment of ecological impacts of using polymer products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 210–215 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-210-215
2. Glushankova I.S., Surkov A.A., Aseeva D.V. Thermochemical recycling of polycarbonate consumption waste with obtaining sorption materials with desired properties // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 67–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-067-071
3. Zyryanov I.A., Pozolotin A.P., Budin A.G., Kantor E.V., Vladykin A.S. The experimental investigation of the electrostatic field influence on carbon monoxide and nitric oxide exhausting during the polymer combustion // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 149–154 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-149-154
4. Zaaba N.F., Jaafar M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation // *Polymer Engineering and Science*. 2020. V. 60. No. 9. P. 2061–2075. doi: 10.1002/pen.25511
5. Bozarova G.K., Khachaturov A.E. The place of biodegradable polymers in the total volume of plastics production // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 93–99 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-093-099
6. Xie Z., Zhang Y., Liu L., Weng H., Mason R.P., Tang L., Nguyen K.T., Hsieh J.T., Yang J. Development of intrinsically photoluminescent and photostable poly(lactones) // *Advanced Materials*. 2014. V. 26. P. 4491–4496. doi: 10.1002/adma.201306070
7. Jeon H.J., Kim M.N. Biodegradation of poly(L-lactide) (PLA) exposed to UV irradiation by a mesophilic bacterium // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013. V. 85. P. 289–293. doi: 10.1016/j.ibiod.2013.08.013
8. Fukui T., Niikura T., Oda T., Kumabe Y., Ohashi H., Sasaki M., Igarashi T., Kunisada M., Yamano N., Oe K., Matsumoto T., Matsushita T., Hayashi S., Nishigori C., Kuroda R. Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans // *PLOS ONE*. 2020. V. 15. No. 8. Article No. e0235948. doi: 10.1371/journal.pone.0235948

9. Sabaa M.W., Sanad M.A., El-Ghaffar M.A.A., Abdelwahab N.A., Sayed S.M.A., Soliman S.M.A. Synthesis, characterization, and application of polyanisidines as efficient photostabilizers for poly(vinyl chloride) films // *Journal of Elastomers & Plastics*. 2020. V. 52. No. 6. P. 537–547. doi: 10.1177/0095244319877668
10. El-Hiti G.A., Ahmed D.S., Yousif E., Al-Khazrajy O. S. A., Abdallah M., Alanazi S.A. Modifications of polymers through the addition of ultraviolet absorbers to reduce the aging effect of accelerated and natural irradiation // *Polymers*. 2022. V. 14. No. 1. Article No. 20. doi: 10.3390/polym14010020
11. Polovinkina M.A., Kolyada M.N., Osipova V.P., Berberova N.T., Chukicheva I.Yu., Shumova O.A., Kutchin A.V. The redox properties and antiradical activity of terpenophenols // *Doklady Chemistry*. 2019. V. 484. No. 2. P. 48–51. doi: 10.1134/S001250081902006X
12. Belyaev V.N., Shchukina O.V., Yashin A.Ya., Yashin Ya.I., Fedorova I.V., Chukicheva I.Yu., Kutchin A.V. Amperometric method for the determination of relative antioxidant activity of isobornylphenol // *Russian Chemical Bulletin*. 2019. V. 68. P. 2325–2330. doi: 10.1007/s11172-019-2706-x
13. Shishkina L.N., Babkin A.Yu., Klimovich M.A., Kozlov M.V., Mazaletskaya L.I., Sheludchenko N.I., Chukicheva I.Yu., Fedorova I.V., Kutchin A.V. A Study of the antioxidative and radioprotective properties of isobornylphenols during X-Ray irradiation at a low dose // *Biophysics*. 2019. V. 64. P. 984–990. doi: 10.1134/S0006350919060198
14. Polovinkina M.A., Kolyada M.N., Osipova V.P., Berberova N.T., Chukicheva I.Yu., Shumova O.A., Kutchin A.V. The redox properties and antiradical activity of terpenophenols // *Doklady Chemistry*. 2019. V. 484. No. 2. P. 48–51. doi: 10.1134/S001250081902006X
15. Buravlev E.V., Shchukina O.V., Shevchenko O.G., Chukicheva I.Yu., Kutchin A.V. Synthesis and radical scavenging activity of dimethylaminomethyl derivatives of 2-isobornyl-6(4)-(1-phenylethyl)phenol and 2-isobornyl-6(4)-(1-phenylpropyl)phenol // *Russian Journal of Organic Chemistry*. 2017. V. 53. No. 11. P. 1756–1759. doi: 10.1134/S1070428017110276
16. Gardette M., Therias S., Gardette J.L., Murariu M., Dubois Ph. Photooxidation of polylactide/calcium sulphate composites // *Polymer Degradation and Stability*. 2011. V. 96. No. 4. P. 616–623. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.023
17. Sadykov R.A., Safyna G.D., Kozhanov K.A., Chukicheva I.Yu., Kutchin A.V. EPR of phenolic antioxidant radicals with terpene substituents // *Butlerovskiyе soobshcheniya*. 2015. V. 43. No. 7. P. 76–81 (in Russian).
18. Sadykov R.A., Safyna G.D., Chukicheva I.Yu., Kinzyabulatov R.R., Kutchin A.V. EPR spectra of phenoxy radicals from 2,6-diisobornyl-4-methylphenol // *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*. 2012. No. 8. P. 1650–1651 (in Russian). doi: 10.1007/s11172-012-0229-9

Электрохимические методы определения аскорбиновой кислоты в биологически активных добавках

© 2022. А. И. Фокина, к. б. н., доцент,

Е. Г. Фоминых, к. т. н., доцент,

К. И. Южанин, магистрант,

Вятский государственный университет,

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

e-mail: annushka-fokina@mail.ru

Одним из последствий влияния неблагоприятных экологических факторов на человека является развитие в организме окислительного стресса. Существенную роль в борьбе с окислительными процессами играют антиоксиданты, в том числе аскорбиновая кислота (АК). Разработка методов количественного определения АК в фармацевтических препаратах и биологически активных добавках (БАД), содержащих несколько антиоксидантов и вспомогательные вещества, остаётся актуальной задачей.

Показана возможность применения кулонометрического с бипотенциометрической индикацией и прямого потенциометрического методов анализа для определения АК в БАД. Установлено, что при использовании иода в качестве окислителя оба метода позволяют получать хорошо повторяющиеся результаты (относительное среднеквадратичное отклонение не превышает 2,0%). Зависимость аналитического сигнала от массы навесок препаратов (в области 80–120% от стандартной массы 0,1 или 0,2 г в зависимости от методики) имеет линейный характер с R не менее 0,99, а результаты, полученные методом «введено-найдено», отвечают требованию правильности. Доказано, что рутин, глюкоза и вспомогательные вещества не мешают определению АК предлагаемыми методами.

Ключевые слова: аскорбиновая кислота, глюкоза, рутин, кулонометрия, потенциометрия, определение.

Electrochemical methods for the determination of ascorbic acid in biologically active additives

© 2022. A. I. Fokina ORCID: 0000-0001-8265-8882

E. G. Fominykh ORCID: 0000-0001-9659-6521

K. I. Yuzhanin ORCID: 0000-0002-8359-1920

Vyatka State University,

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

e-mail: annushka-fokina@mail.ru

One of the negative consequences of the impact of adverse environmental factors on a humans is the development of oxidative stress in the body, which causes deviations in the state of human health. An important role in the fight against oxidative processes is played by antioxidants, including ascorbic acid (AA). Along with food, biologically active additives (BAA) can be an additional source of AA intake into the body.

The correct assessment of the AA content in pharmaceutical preparations helps to solve an important problem of food ecology – the balanced use of vitamin C. Therefore, the development of new and improvement of existing methods of analysis for determining the content of AA in various objects remains an urgent task.

The use of instrumental methods for fixing the end point of the titration increases the accuracy of the analysis. Simple and economical electrochemical methods such as potentiometry and coulometry can be used to implement the iodometric titration method. Despite all the advantages of coulometric and potentiometric methods of analysis and their widest distribution in various fields of science and technology, there are no data in the literature on the possibility of implementing the coulometric determination of AA with potentiometric indication and direct potentiometric titration, which are based on the reaction with iodine.

As a result of the study, it was found that in the determination of AA by both methods, well-repeated results were obtained (the relative standard deviation does not exceed 2.0%), the dependence of the analytical signal on the sample mass (in the range of 80–120% to standard weight 0,1 or 0,2 g depending on the method) is linear with R not less than 0.99, and the results obtained by the “introduced-found” method satisfy the requirement of correctness.

Keywords: ascorbic acid, glucose, rutin, coulometry, potentiometry, determination.

Известно, что заболевания человека могут быть вызваны многими экологическими факторами [1–3]. Неблагоприятная экологическая обстановка считается одной из главных причин развития в организме человека оксидативного стресса, который, в свою очередь, приводит к возникновению ряда серьёзных заболеваний [3–5]. Противостоять окислительным процессам способны антиоксиданты, в том числе аскорбиновая кислота (АК, витамин С) [6, 7].

Наряду с продуктами питания, источником поступления АК в организм могут быть соответствующие лекарственные формы и различные биологические активные добавки (БАД). Доказано положительное влияние АК на снижение интенсивности окислительных процессов [6, 7], однако чрезмерное её употребление может иметь и отрицательный эффект. Поэтому остаётся актуальной задача по разработке новых и совершенствованию существующих методов анализа для определения содержания АК в различных объектах: фармацевтических препаратах, растительном сырье, продуктах питания и т. д. [8–13].

В общем виде реакция, лежащая в основе кулонометрического и потенциометрического определений, заключается в обратимом окислении АК иодом до дегидроаскорбиновой кислоты. При реализации метода кулонометрии титрование происходит электрогенерированным на аноде при постоянной силе тока иодом. В методе потенциометрии титрование проводят стандартизованным раствором иода. Отсутствие необходимости стандартизовать раствор иода – положительная сторона кулонометрии. Количество иода, затраченное на реакцию с определяемой АК, рассчитывают по закону Фарадея. Кроме того, анализ достаточно экспрессный. Положительными сторонами потенциометрического определения являются экономичность и простота [14, 15].

Несмотря на все достоинства кулонометрического и потенциометрического методов анализа и их широчайшее распространение в различных областях науки и техники [15–18], в литературе отсутствуют данные о возможности реализации кулонометрического определения АК с потенциометрической индикацией и прямого потенциометрического титрования, в основе которых лежит реакция с иодом.

Поэтому целью работы было установить возможность применения кулонометрического метода с бипотенциометрической индикацией и прямого потенциометрического метода для определения АК в БАД, используя её реакцию с иодом.

Объекты и методы исследования

Использованы БАД «Аскорбиновая кислота + рутин», с заявленным производителем содержанием АК в таблетке 50 мг (ООО «ВТФ», Россия) и «Аскорбиновая кислота с глюкозой» с заявленным производителем содержанием АК в таблетке 100 мг (ОАО «Фармстандарт-УфаВИТА», Россия).

Для определения влияния глюкозы и рутина на результат определения АК использованы модельные смеси АК с глюкозой (100 мг АК + 877 мг глюкозы) и АК с рутином (50 мг АК + 50 мг рутина).

Определение АК в препаратах методом кулонометрии. Кулонометрическое титрование проведено с бипотенциометрической индикацией на приборе марки «Эксперт-006» (ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ», Россия). Исследование препаратов вели по схеме: 0,1 г препарата (точная навеска) переносили в мерную колбу вместимостью 50 мл и доводили дистиллированной водой объём раствора до метки. В кулонометрической ячейке использовали 0,1 М раствор иодида калия в 0,1 М соляной кислоте. Для анализа в кулонометрическую ячейку вносили 1 мл исследуемого раствора.

Определение АК в препаратах методом потенциометрии. Потенциометрическое титрование проведено с потенциометрической индикацией на приборе марки «И-160 МИ» (ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ», Россия) с использованием измерительного платинового электрода и хлорсеребряного электрода сравнения.

Для определения АК в препарате «Аскорбиновая кислота с глюкозой» исследование вели по схеме: 0,2 г препарата (точная навеска) переносили в ячейку для титрования. В качестве растворителя использовали 0,1 М соляную кислоту. Титровали 0,05 н. стандартизованным раствором иода.

Для определения АК в препарате «Аскорбиновая кислота + рутин» исследование вели по схеме: 0,1 г препарата (точная навеска) переносили в мерную колбу вместимостью 50 мл и доводили дистиллированной водой объём раствора до метки. В электрохимической ячейке использовали 0,1 М соляную кислоту. Для анализа в ячейку вносили 4 мл исследуемого раствора. Титровали 0,05 н. стандартизованным раствором иода.

Для каждого метода определяли такие метрологические характеристики, как повторяемость ($n = 6$), линейность (пять уровней

концентрации АК создавали варьированием массы навески препарата: 80, 90, 100, 110 и 120%, $n = 3$) и правильность (добавляли известное количество стандартного образца к исследуемому раствору препарата, в качестве стандартного образца использовали АК; три уровня концентраций, $n = 3$).

Во всех расчётах значение величины доверительной вероятности принято $P \geq 0,95$. В качестве критерия приемлемости линейности ориентировались на значение $R \geq 0,99$, повторяемости – 2%.

Результаты и обсуждение

Метрологическая характеристика результатов определения АК в препарате «Аскорбиновая кислота с глюкозой». Установлено, что глюкоза не влияет на результат определения АК ни одним из исследуемых методов. Величина содержания АК (100 мг) в модельной смеси с глюкозой находится в доверительном интервале экспериментально найденных значений при исследовании смеси (100,1±2,5 мг – кулонометрия; 101,2±2,5 мг – потенциометрия), что подтверждает литературные данные [15] о возможности применения методов для определения АК в присутствии глюкозы.

По характеристике «линейность» обе методики показали схожие результаты: коэффициенты детерминации отличаются друг от друга в четвёртом знаке (рис. 1). В обоих случаях зависимости между аналитическими сигналами (продолжительность гене-

рации иода, затрачиваемого на окисление АК, – кулонометрия; объём раствора иода, пошедший на титрование, – потенциометрия) и массами навесок препарата имеют линейный характер ($R = 0,9974$ и $0,9972$ соответственно).

Оба метода дают повторяющиеся результаты, величина относительного среднеквадратичного отклонения (СКО) не превышает 2,0% (табл. 1). **Значение содержания АК**, полученное методом потенциометрии, несколько выше, чем значение, полученное методом кулонометрии. Между средними значениями, полученными разными методами, есть статистически достоверное различие (t -тест). Достоверное отличие между СКО отсутствует (F -тест).

Проверка правильности результатов (табл. 2) также даёт для потенциометрического определения результаты несколько выше, чем для кулонометрии. Одна из причин может заключаться в самой технике проведения анализа, в том числе, в особенностях дозирования иода в количествах, необходимых для более точной фиксации точки эквивалентности. Кулонометрический анализ позволяет более дискретно дозировать количество иода, не требует вмешательства в процесс дозирования какого-либо оборудования (бюреток, дозаторов и т. п.), вносящих погрешность в анализ. Вторая причина, приводящая к «завышению» результатов потенциометрического определения АК, по-видимому, связана с чувствительностью рабочего окислительно-восстановительного электрода (ОВЭ). Скачок

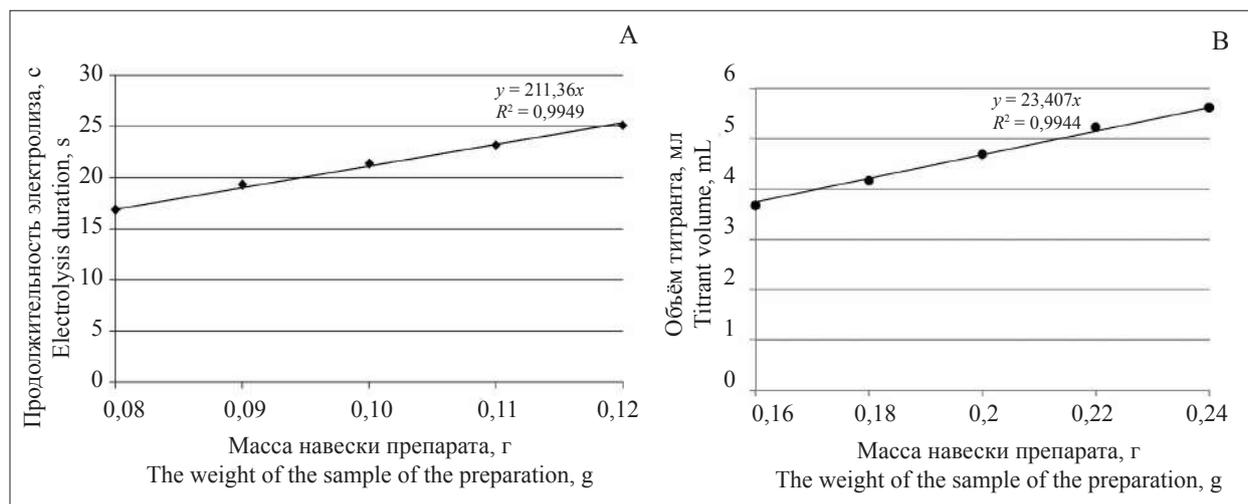


Рис. 1. Зависимость количественной характеристики титрования от массы навесок препарата: А – кулонометрия, В – потенциометрия
Fig. 1. Dependence of the quantitative characteristic of titration on the mass of the preparation samples: А – coulometry, В – potentiometry

Таблица 1 / Table 1

Метрологическая характеристика повторяемости результатов определения аскорбиновой кислоты в препарате «Аскорбиновая кислота с глюкозой» / Metrological characteristic of the repeatability of ascorbic acid in the preparation "Ascorbic acid with glucose"

Найдено, мг Found, mg	$X_{cp.}$, мг $X_{av.}$, mg	СКО Standard deviation (SD)	Относительное СКО, % Relative SD, %	$\Delta X = (CKO \cdot t) / \sqrt{n}$ $\Delta X = (SD \cdot t) / \sqrt{n}$
Кулонометрия / Coulometry				
98,5	98,8	1,29	1,31	1,61
98,7				
100,0				
100,0				
96,5				
99,1				
Потенциометрия / Potentiometry				
103,9	103,9	1,45	1,39	1,80
101,7				
103,5				
104,6				
103,5				
106,1				

Таблица 2 / Table 2

Данные для оценки правильности результатов определения аскорбиновой кислоты в препарате «Аскорбиновая кислота с глюкозой» / Data for assessing the correctness of the ascorbic acid determination results in the preparation "Ascorbic acid with glucose"

Введено аскорбиновой кислоты, мг Added ascorbic acid, mg	Найдено аскорбиновой кислоты, мг / Found ascorbic acid, mg	
	кулонометрия coulometry	потенциометрия potentiometry
80	80,7±0,8	83,0±5,2
100	99,8±1,0	105,0±5,4
120	119,8±3,6	123,5±7,7

потенциала в системе Pt | I₂, Γ (иодид-ион) на основании которого устанавливается точка эквивалентности, возникает только при появлении в анализируемом растворе избыточного иода. Расчёт по уравнению Нернста показывает, что изменение потенциала ОВЭ, например, на 20 мВ будет регистрироваться при соотношении концентраций $C_{I_2} / (C_{I^-})^2 = 4,7$, приводя к погрешности при фиксации конечной точки титрования.

Количество кислоты, указанное на упаковке, составляет 100 мг, что согласуется с результатом, полученным методом кулонометрии (98,8±1,4 мг). Методом потенциометрии получены более высокие результаты (103,9±1,5 мг).

Несмотря на более высокие значения, получаемые методом потенциометрического титрования, оба метода, с точки зрения норм допустимых отклонений, позволяют получить правильные результаты, так как значения добавок, принимаемые за истинные (опорные),

лежат внутри доверительных интервалов соответствующих средних результатов анализов (табл. 2).

Метрологическая характеристика результатов определения АК в препарате «Аскорбиновая кислота + рутин». Установлено, что рутин не влияет на результат определения АК ни одним из исследуемых методов. Значение содержания АК (50 мг) в модельной смеси с рутином находится в доверительном интервале экспериментально найденных значений при исследовании смеси (50,6±1,5 мг – кулонометрия; 52,5±2,6 мг – потенциометрия), что подтверждает литературные данные [14] о возможности применения методов для определения АК в присутствии рутина.

В результате исследования зависимости между аналитическим сигналом и массами навесок препарата (рис. 2) установлено, как в случае с кулонометрией, так и в случае с потенциометрией, наличие линейной зависимости ($R = 0,9932$ и $0,9956$ соответственно).

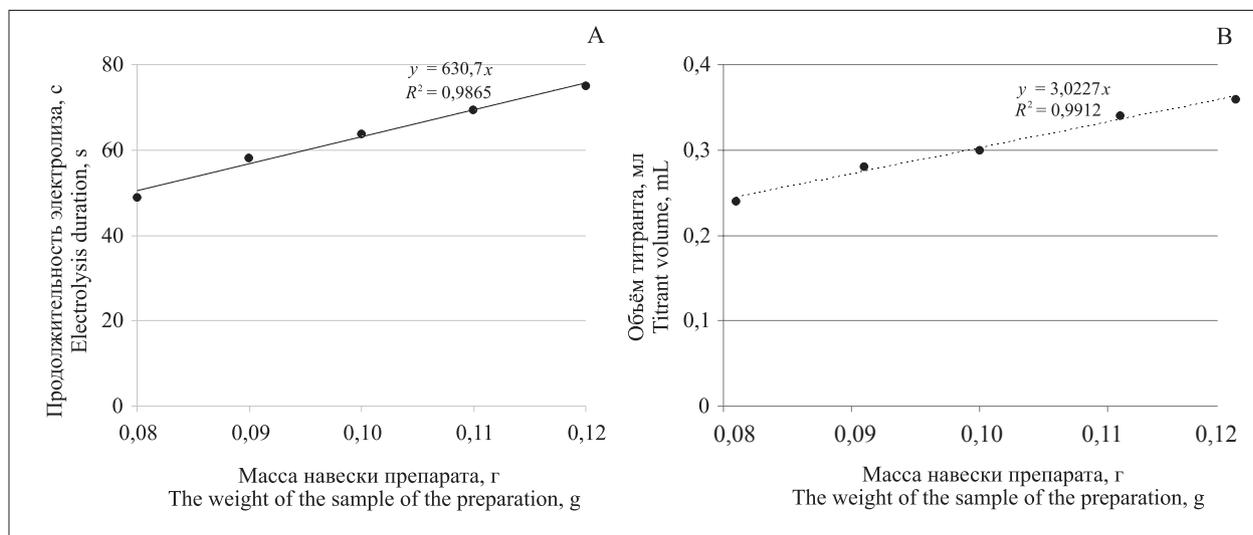


Рис. 2. Зависимость количественной характеристики титрования от массы навесок препарата: А – кулонометрия, В – потенциметрия
Fig. 2. Dependence of the quantitative characteristic of titration on the mass of the preparation samples: А – coulometry, В – potentiometry

Как и в случае с препаратом «Аскорбиновая кислота с глюкозой» присутствует тенденция к увеличению результатов, получаемых методом потенциметрии при определении АК в препарате «Аскорбиновая кислота + рутин». Однако достоверного отличия между средними значениями, полученными разными методами не обнаружено (*t*-тест). Это указывает на наличие влияния не только факторов, связанных с самой методикой, но и с особенностями препарата. Результаты, полученные методом

кулонометрии, близки к среднему значению содержания АК, указанному на упаковке производителем (50 мг). **Результаты потенциметрического титрования** несколько выше (табл. 3).

При проверке правильности получаемых результатов показано, что значения добавок, принимаемых за истинные (опорные), лежат внутри доверительных интервалов соответствующих средних результатов анализов. Следовательно, получаемые результаты можно считать правильными (табл. 4).

Таблица 3 / Table 3

Метрологическая характеристика повторяемости результатов определения аскорбиновой кислоты в препарате «Аскорбиновая кислота+рутин» / Metrological characteristic of the repeatability of ascorbic acid in the preparation “Ascorbic acid + rutin”

Найдено, мг Found, mg	$X_{cp.}, мг$ $X_{av.}, mg$	СКО Standard deviation (SD)	Относительное СКО, % Relative SD, %	$\Delta X = (CKO \cdot t) / \sqrt{n}$ $\Delta X = (SD \cdot t) / \sqrt{n}$
Кулонометрия / Coulometry				
50,8	51,1	1,04	2,04	1,29
49,5				
50,3				
51,9				
51,8				
52,1				
Потенциметрия / Potentiometry				
53,1	52,9	0,92	1,73	1,14
52,2				
52,0				
54,5				
52,4				
53,1				

Таблица 4 / Table 4

Данные для оценки правильности результатов определения аскорбиновой кислоты в препарате «Аскорбиновая кислота + рутин» / Data for assessing the correctness of the ascorbic acid determination results in the preparation "Ascorbic acid + rutin"

Введено аскорбиновой кислоты, мг Added ascorbic acid, mg	Найдено аскорбиновой кислоты, мг / Found ascorbic acid, mg	
	кулонометрия coulometry	потенциометрия potentiometry
40,0	41,0±1,5	41,4±1,6
50,0	51,7±1,7	52,2±2,7
60,0	61,8±1,9	–

Примечание / Note: «–» – данные отсутствуют / no data.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что при определении АК обоими методами получаются хорошо повторяющиеся результаты (относительное СКО не превышает 2,0%), зависимость аналитического сигнала от массы навесок препаратов (в области 80–120%) имеет линейный характер с R не менее 0,99, а результаты, получаемые методом «введено-найденно» отвечают требованию правильности. Всё это указывает на то, что имеет смысл исследовать особенности применения данных методов для определения АК в фармацевтических препаратах в сторону улучшения метрологических характеристик и внедрения их в аналитический контроль качества.

Следует отметить, что необходим поиск оптимального проведения потенциометрического анализа с целью минимизации погрешностей, связанных с точностью дозирования титранта и индикацией точки конца титрования.

Полученные данные и предложенные методические подходы могут быть полезны в экологических исследованиях антиоксидантной активности различных растительных объектов и трактовке результатов, так как титрование растворами галогенов в настоящее время является одним из ведущих принципов анализа.

References

1. Abdurakhmanov G.M., Gasangadzhieva A.G., Abdurakhmanova E.G., Magomedova A.G. The state of environmental components and the incidence of malignant neoplasms in the Laksky district of the Republic of Dagestan // Problemy regionalnoy ekologii. 2006. No. 6. P. 30–33 (in Russian).
2. Cherevatenko A.A. Environmental risk factors for human health // Zhurnal fundamentalnoy meditsiny i biologii. 2018. No. 3. P. 39–45 (in Russian).
3. Tseylikman V.E., Lukin A.A. Effects of oxidative stress on human health // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2022. No. 3–1 (117). P. 206–211 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2022.117.3.037

4. Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 4–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019

5. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

6. Ramanathan K., Balakumar B.S., Panneerselvam C. Effects of ascorbic acid and a-tocopherol on arsenic-induced oxidative stress // Human & Experimental Toxicology. 2002. V. 21. No. 12. P. 675–680. doi: 10.1191/0960327102ht307oa

7. Patra R.C., Swarup D., Dwivedi S.K. Antioxidant effects of α tocopherol, ascorbic acid and L-methionine on lead induced oxidative stress to the liver, kidney and brain in rats // Toxicology. 2001. V. 162. No. 2. P. 81–88. doi: 10.1016/S0300-483X(01)00345-6

8. Burykh G.V., Gusel'nikova T.V., Durnev D.A., Kosyashnikova Yu.A. Determination of the content of ascorbic acid in the drug "Asvitol" by spectrophotometric and chromatographic methods // Izvestiya Yugo-zapadnogo universiteta: Seriya: tekhnika i tekhnologii. 2022. No. 1. P. 219–244 (in Russian). doi: 10.21869/2223-1528-2022-12-1-219-234

9. Kholod V.M., Pipkina T.V. On the possibility of using various methods for the determination of ascorbic acid in pharmacopoeial analysis // Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya "Vitebskaya ordena "Znak Pocheta" gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsiny". 2021. V. 57. P. 117–122 (in Russian). doi: 10.52368/2078-0109-2021-57-3-117-122

10. Zhdanov D.A., Kurkin V.A., Braslavskiy V.B., Agapov A.I. Actual aspects of quality control and standardization of rose hips // Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv. 2021. No. 3. P. 167–175 (in Russian). doi: 10.33380/2305-2066-2021-10-3-167-175

11. Atta N.F., Galal A., Ahmed Y.M., El-Ads E.H. Design strategy and preparation of a conductive layered electrochemical sensor for simultaneous determination of ascorbic acid, dobutamine, acetaminophen and amlodipine // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. V. 297. Article No. 126648. doi: 10.1016/j.snb.2019.126648

12. Habib A., Mabrouk M.M. Fekry M., Mansour F.R. Glycerol as a new mobile phase modifier for green liquid chromatographic determination of ascorbic acid and glutathione in pharmaceutical tablets // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2022. V. 219. Article No. 114870. doi: 10.1016/j.jpba.2022.114870

13. Li Yu., Pan F., Yin Sh., Tong Ch., Zhu R., Li G. Nafion assisted preparation of prussian blue nanoparticles and its application in electrochemical analysis of L-ascorbic acid // *Microchemical Journal*. 2022. V. 177. Article No. 107278. doi: 10.1016/j.microc.2022.107278

14. Ziyatdinova G.K., Nizamova A.M., Budnikov G.K. Galvanostatic coulometry in the analysis of natural polyphenols and its application in pharmacy // *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2010. No. 11. P. 1202–1206 (in Russian).

15. Lira O.A., Abdullina S.G. Coulometric determination of ascorbic acid // *Obrazovatelnyy vestnik "Soznanie"*. 2010. V. 12. No 9. P. 431–432 (in Russian).

16. Mashentseva A.A., Kazbekova A.T., Seytembetov T.S. Application of electrochemical methods to determine the antioxidant activity of polyphenolic compounds // *Khabarshysy vestnik*. 2010. V. 4. P. 10–18 (in Russian).

17. Majeed S., Naqvi S.T.R., Haq M.N., Ashiq M.N. Electroanalytical techniques in biosciences: conductometry, coulometry, voltammetry, and electrochemical sensors // *Analytical Techniques in Biosciences*. 2022. P. 157–178. doi: 10.1016/B978-0-12-822654-4.00004-X

18. Budnikov G.K., Shirokova V.I. Development of electroanalysis in the USSR and Russia: coulometric methods // *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2015. No. 1. P. 92–98 (in Russian). doi: 10.7868/S0044450215010053

Сравнительная оценка перспективности использования серопроводящих твёрдых электролитов в составе датчиков на сероводород и диоксид серы

© 2022. Е. В. Кошелева, к. х. н., доцент,

Л. А. Калинина, к. х. н., профессор, Ю. Н. Ушакова, к. х. н., доцент,

Б. А. Ананченко, к. х. н., руководитель НОЦ «Нанотехнологии»,

Вятский государственный университет,

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

e-mail: kosheleva_ekv@mail.ru

В работе представлена сравнительная оценка перспективности использования в составе твёрдоэлектролитных датчиков серосодержащих газов (сероводород и диоксид серы) серопроводящих твёрдых электролитов CaY_2S_4 и CaYb_2S_4 , допированных полуторным сульфидом иттербия (Yb_2S_3). Рассмотрена связь величины сигнала датчика с электродными реакциями на рабочем электроде с учётом парциальных давлений над его составными частями и обоснован характер сигналов при детектировании H_2S и SO_2 . Определены интервалы концентраций обоих газов, в которых сохраняется линейная зависимость сигналов датчиков от содержания детектируемого газа. Проведённое кинетическое исследование позволило объяснить различие в чувствительности датчиков сероводорода и диоксида серы и наметить путь дальнейшего улучшения рабочих характеристик датчиков. Определено, что для детектирования сероводорода и диоксида серы более перспективным представляется использование серопроводящего твёрдого электролита $\text{CaY}_2\text{S}_4 - x \text{Yb}_2\text{S}_3$ ($x = 0-16$ мол.%), обеспечивающего чувствительность датчика на порядок большую, чем использование твёрдого электролита $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - x \text{Yb}_2\text{S}_3$ ($x = 0-12$ мол.%).

Ключевые слова: твёрдотельный электрохимический датчик, сероводород, диоксид серы, серосодержащие газы, серопроводящие твёрдые электролиты, титрат кальция, титрат иттербия, сульфид иттербия.

Comparative evaluation of the prospects of using sulfide-conducting solid electrolytes in the composition of sensors for hydrogen sulfide and sulfur dioxide

© 2022. E. V. Kosheleva ORCID: 0000-0003-1716-9040, L. A. Kalinina ORCID: 0000-0001-9805-9833

Yu. N. Ushakova ORCID: 0000-0002-8917-5055, B. A. Ananchenko ORCID: 0000-0002-7975-7828

Vyatka State University,

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

e-mail: kosheleva_ekv@mail.ru

The article presents a comparative evaluation of the prospects for using sulfur-conducting solid electrolytes CaY_2S_4 and CaYb_2S_4 doped with ytterbium sesquisulfide (Yb_2S_3) as part of solid electrolyte sensors of sulfur-containing gases (hydrogen sulfide and sulfur dioxide). The relationship between the magnitude of the sensor signal and the electrode reactions at the working electrode is considered, taking into account the partial pressures over its components, and the nature of the signals during the detection of H_2S and SO_2 is substantiated. The intervals of gas concentrations that fall into the group of linear signs depending on the content of the detected gas are determined. It has been suggested that the reason for the low sensitivity of the sensors in the range of $P_s < 10^{-10}$ atm is a kinetic nature. As a result of the study, it was found that when detecting a gas containing hydrogen sulfide, the limiting stage is the reaction of adsorption of hydrogen sulfide on the surface of the working electrode (reaction of the first order), and when determining the content of sulfur dioxide, the limiting rate reaction is the desorption reaction of a by-product – oxygen (reaction of the second order). It was carried out a kinetic study of the relationship between the sensitivity of hydrogen sulfide and sulfur dioxide sensors and outlined the sensitivity path of performance sensors. It was found that for the detection of hydrogen sulfide and sulfur dioxide, it is more promising to use the sulfur-conducting solid electrolyte $\text{CaY}_2\text{S}_4 - x \text{mol.}\% \text{Yb}_2\text{S}_3$, where x is 0 to 16 mol.%, the sensor sensitivity is an order of magnitude higher than the use of solid electrolyte $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - x \text{mol.}\% \text{Yb}_2\text{S}_3$, where x is 0 to 12 mol.%.

Keywords: solid state electrochemical sensor, hydrogen sulfide, sulfur dioxide, sulfur-containing gases, sulfide-conducting solid electrolytes, calcium thioitrate, calcium thioytterbate, ytterbium sulfide.

Сероводород (H_2S) – бесцветный газ с характерным неприятным запахом. Является одним из наиболее опасных загрязнителей атмосферного воздуха. Токсическое действие сероводорода основано на трёх процессах: угнетении и поражении центральной нервной системы, изменении механизмов окисления, снижении способности крови насыщаться кислородом [1, 2].

Диоксид серы (SO_2) – бесцветный газ с резким запахом. Основная особенность данного газа заключается во взаимодействии с водой, которое приводит к образованию серной и сернистой кислот. Данное явление лежит в основе образования кислотных дождей, приносящих негативные последствия сельскому хозяйству, металлоконструкциям, а также экосистемам различного типа. У человека диоксид серы нарушает углеводный и белковый обмен, вызывает общее отравление организма [3].

Таким образом, задача контроля концентрации сероводорода и диоксида серы в воздушной среде при эксплуатации технологических установок в производственных помещениях является очень важной. Перспективным направлением является разработка потенциометрических (электрохимических) систем, обладающих высокой селективностью, быстродействием и большим интервалом измеряемых величин [4].

Целью работы является получение сравнительной оценки перспективности использования двух типов серопроводящих твёрдых электролитов титоиттербиата кальция, содержащего избыток сульфида иттербия и титоттрата кальция, также допированного сульфидом иттербия.

Объекты и методы исследования

Для изготовления серопроводящих мембран использовали оксиды: CaO классификации «ч. д. а», Y_2O_3 классификации «ос. ч.», Yb_2O_3 (99,99% Aldrich). Расчётные количества обезвоженных оксидов тщательно перемешивались в присутствии этанола. Затем оксидную смесь сульфидировали. Данный процесс заключается в том, что через реактор, находящийся в высокотемпературной печи, прокачивают аргон, насыщенный парами сероуглерода. Обязательным условием является максимальная очистка аргона от следов кислорода и паров воды. Для этого использовался стенд очистки и осушки газов «ЭПИШУР-11СЛ». Параметры синтеза и отжига рассматриваемых электролитов представлены в таблице 1.

Полученный материал давлением 680–980 МПа с выдержкой продолжительностью 1 мин прессовали в «таблетки».

Таблица 1 / Table 1

Параметры синтеза и отжига твёрдых электролитов
Synthesis and annealing modes of solid electrolytes

Твёрдый электролит Solid electrolyte	Температура синтеза, °C Temperature of synthesis, °C	Время синтеза, ч The time of synthesis, h	Температура отжига, °C Temperature of annealing, °C	Время отжига, ч The time of annealing, h
$CaY_2S_4-Yb_2S_3$	1136	7	1136	6
$CaYb_2S_4-Yb_2S_3$	1000	10	1000	10

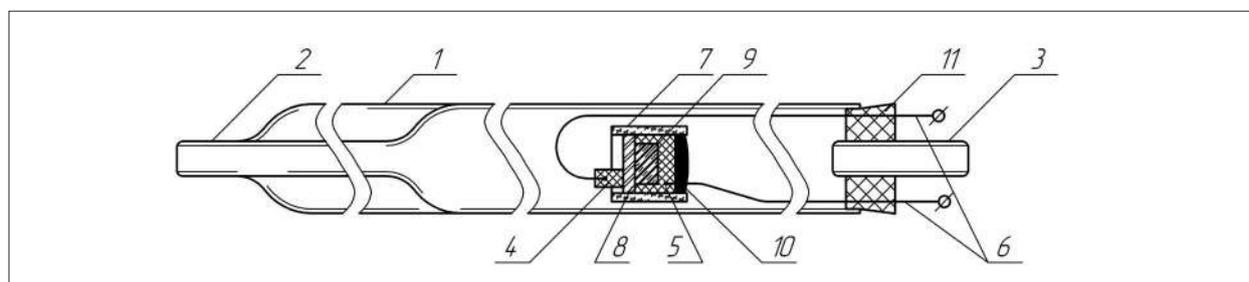


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки: 1 – трубка из кварцевого стекла; 2 – штуцер для подачи газа; 3 – штуцер для отвода газа; 4 – графитовый электрод; 5 – графитовый проводник; 6 – нихромовые проводники; 7 – кварцевый стаканчик; 8 – твёрдоэлектролитная мембрана; 9 – электрод сравнения; 10 – высокотемпературная композиция; 11 – пробка [5]

Fig. 1. Measuring cell design: 1 – quartz glass tube; 2 – fitting for gas supply; 3 – fitting for gas outlet; 4 – graphite electrode; 5 – graphite conductor; 6 – nichrome conductors; 7 – quartz glass; 8 – solid electrolyte membrane; 9 – reference electrode; 10 – high-temperature composition; 11 – stopper [5]

Для газового анализа была создана лабораторная модель датчика: измерительная ячейка представляла собой кварцевую трубу (1) со штуцерами для подачи (2) и отвода (3) газа. Для герметизации ячейки использовали пробки из вакуумированной резины. Конструкция ячейки показана на рисунке 1.

Собранный элемент датчика высушивали в силикагеле 20–24 ч, а затем – в течение 3 ч при температуре 100 °С в атмосфере аргона для удаления паров воды. После этого элемент был готов к проведению газового анализа [6].

Результаты и обсуждение

В качестве объектов сравнительной оценки выбраны системы $\text{CaY}_2\text{S}_4 - x \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ и $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - x \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$. Обе системы имеют одинаковую орторомбическую структуру Yb_3S_4 , а также способны к образованию широких областей твёрдых растворов (с сохранением сульфидионного типа ионной проводимости в CaY_2S_4 можно ввести до 16 мол. % включительно, а в CaYb_2S_4 – до 12 мол. %) [7, 8]. В качестве мембраны сенсора были апробированы твёрдые электролиты, входящие в электролитический интервал с «шагом» 4 мол. %. Разработку и усовершенствование режима работы датчика проводили путём варьирования величин температуры и скорости потока несущего газа [9].

Перед сборкой модели датчика на сероводород и диоксид серы у каждого твёрдого электролита оценивали величину электропроводности, значение ионных чисел переноса, а также верхний предел температурной устойчивости образца (табл. 2).

Как видно из данных таблицы 2, представленные электролитические свойства позволяют считать твёрдые электролиты как на основе титаниттербиата кальция, так и на основе титратра кальция униполярными ионными

проводниками, что делает возможным их использование в качестве мембраны датчика потенциометрического типа.

Выбор рабочих температур для проведения газового анализа обусловлен температурным электролитическим интервалом использованных в датчике мембран. В процессе газового анализа для датчика на основе $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ температура составила 270–350 °С, а для датчика на основе $\text{CaY}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ – 415–475 °С.

После аттестации образцов собирали модель датчика, основой которого является электрохимическая ячейка:

$\text{C} | \text{Me}, \text{MeS} | \text{мембрана} | \text{H}_2\text{S} (\text{SO}_2), \text{Ar} | \text{C}$.

В качестве мембраны использовали рассматриваемые серопроводящие системы ($\text{CaYb}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ и $\text{CaY}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$).

$\text{C}/\text{Me}, \text{MeS}$ – электрод сравнения. В сравниваемых датчиках электрод сравнения представляет собой сульфид висмута с небольшой добавкой (2 масс. %) металлического висмута. Роль электрода сравнения заключается в создании постоянного парциального давления серы.

$\text{H}_2\text{S} (\text{SO}_2), \text{Ar}/\text{C}$ – рабочий электрод – смесь серосодержащего детектируемого газа с аргоном.

Потенциал рабочего электрода должен возникать на трёхфазной границе: твёрдый электролит – графит – анализируемый газ. Для этого на этапе конструирования датчика следует предусмотреть изоляцию всех боковых поверхностей мембраны, кроме торцевой.

В процессе газового анализа через модель датчика пропускали с постоянной скоростью аргон, в который импульсно вводили анализируемый газ. Установлено, что оптимальная скорость потока аргона составляет 0,03–0,05 л/мин. При данной скорости формируется стабильный ламинарный режим

Таблица 2 / Table 2
Основные электролитические характеристики твёрдых электролитов на основе CaYb_2S_4 и CaY_2S_4
Main electrolytic characteristics of Solid Electrolytes based on CaYb_2S_4 and CaY_2S_4

Твёрдые электролиты Solid electrolytes	Электропроводности при $t = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ Conductivity at $t = 350 \text{ }^\circ\text{C}$	Сульфидионные числа переноса Sulfidion transfer numbers	Верхний предел температурной устойчивости, $^\circ\text{C}$ / Upper limit of temperature stability, $^\circ\text{C}$
CaY_2S_4	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,99	650
$\text{CaY}_2\text{S}_4 - x \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$	10^{-4}	1,00	620
CaYb_2S_4	$3 \cdot 10^{-5}$	0,97	450
$\text{CaYb}_2\text{S}_4 - x \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,99	450

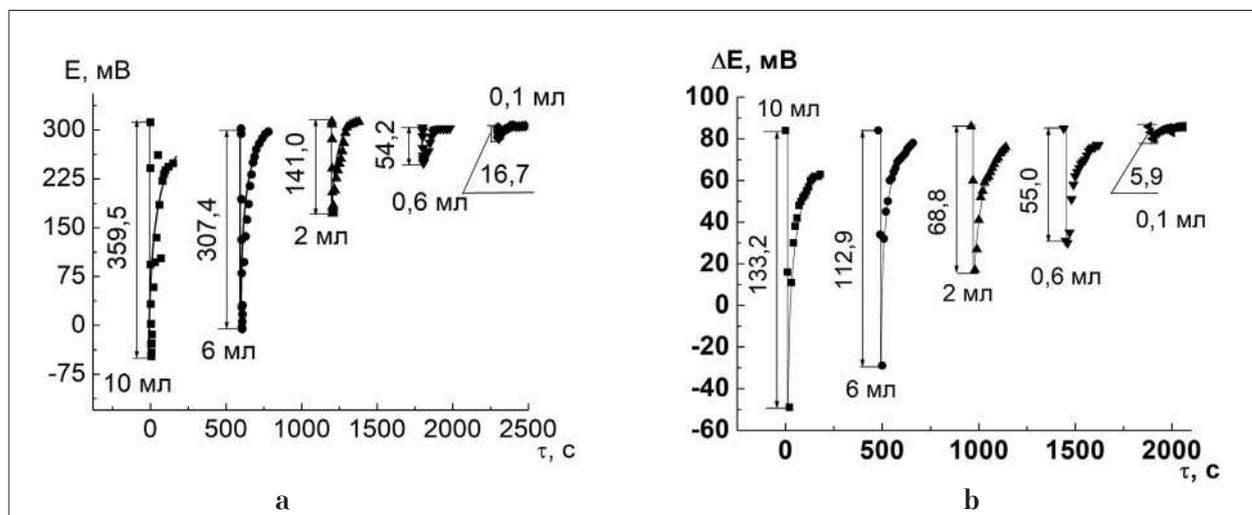


Рис. 2. Сигнал датчика на различные объёмы введённого сероводорода: а) мембрана $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$ [2]; б) мембрана $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$
Fig. 2. Sensor responses to the introduction of various volumes of H_2S into the system: а) membrane $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$ [2]; б) membrane $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$

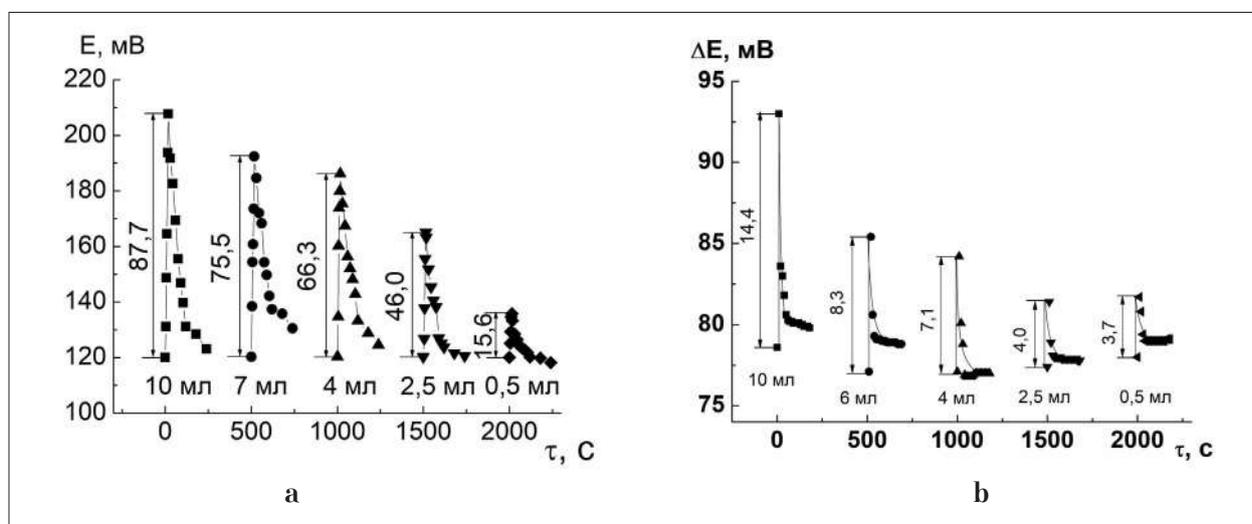


Рис. 3. Сигнал датчика на различные объёмы введённого диоксида серы: а) мембрана $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$ [2]; б) мембрана $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$
Fig. 3. Sensor responses to the introduction of various volumes of SO_2 into the system: а) membrane $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$ [2]; б) membrane $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол.}\% \text{ Yb}_2\text{S}_3$

течения ($Re < 2$). При этом без затруднений удаляются побочные газообразные продукты такие, как кислород и водород. Зависимость ЭДС от времени (сигнал датчика) имеет дифференциальный характер (рис. 2–3).

Очевидно, что у датчика на основе $\text{CaY}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ значительно больше величина отклика (разница между начальным значением ЭДС и потенциалом экстремума). Так, при введении 10 мл H_2S отклик датчика с мембраной $\text{CaY}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ составляет 360 мВ, а с мембраной $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ – только 133 мВ.

Для теоретического обоснования работы датчика с помощью констант термической диссоциации рассчитаны парциальные дав-

ления паров серы над всеми составными частями датчика.

Для датчика с мембраной $\text{CaY}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ в исследуемом интервале температур давление над составными частями: парциальное давление серы над рабочим электродом ($P_{\text{ра}}$) (H_2S) $\approx 10^{-1}$, парциальное давление серы над твёрдым электролитом ($P_{\text{тв}}$) $\approx 10^{-22}$, парциальное давление серы над электродом сравнения ($P_{\text{эс}}$) $\approx 10^{-12}$, парциальное давление серы над рабочим электродом ($P_{\text{ра}}$) (SO_2) $\approx 10^{-50}$ атм. Для мембраны $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - \text{Yb}_2\text{S}_3$ рабочая электролитическая область ниже, поэтому давление составляет $P_{\text{ра}}(\text{H}_2\text{S}) \approx 10^{-8}$, $P_{\text{ра}}(\text{SO}_2) \approx 10^{-51}$, $P_{\text{тв}} \approx 10^{-22}$, $P_{\text{эс}} \approx 10^{-16}$ атм. Как видно из пред-

ставленных значений, парциальные давления паров серы соотносятся как $P_{\text{тз}} < P_{\text{эс}} < P_{\text{рз}}$.

До введения сероводорода в качестве основного донора паров серы над рабочим электродом выступает твёрдоэлектролитная мембрана за счёт термической диссоциации образующих её сульфидов. В связи с тем, что $P_{\text{тз}} < P_{\text{эс}}$, суммарная реакция потенциалобразующих процессов будет выглядеть так: $\text{Bi}_2\text{S}_3 \leftrightarrow 2\text{Bi} + 3/2\text{S}_2$, а величину ЭДС до введения определяемого газа можно рассчитать по формуле:

$$E_1 = \frac{2,3RT}{6F} \lg \frac{P_{\text{эс}}}{P_{\text{тз}}^{3/2}}, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, F – постоянная Фарадея, $P_{\text{эс}}$ – парциальное давление серы над электродом сравнения, $P_{\text{тз}}$ – парциальное давление над твёрдым электродом.

После введения сероводорода за счёт значительного превышения парциального давления серы над рабочим электродом по отношению парциального давления серы над электродом сравнения происходит изменение знака разности потенциалов. Уравнение суммарной реакции в данном случае может быть записано в виде: $3\text{H}_2\text{S} + 2\text{Bi} \leftrightarrow \text{Bi}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2$.

Значение ЭДС после введения сероводорода:

$$E_2 = \frac{2,3RT}{6F} \lg \frac{P_{\text{рз}}^3}{P_{\text{эс}}}. \quad (2)$$

Тогда величина отклика (сигнала) датчика будет равна:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{RT}{6F} \ln \frac{P_{\text{рз}}^3 \cdot P_{\text{тз}}^{3/2}}{P_{\text{эс}}^2}; \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{RT}{6F} \ln \frac{10^{-24} \cdot 10^{-33}}{10^{-32}} < 0,$$

и датчик реагирует значительным уменьшением ЭДС цепи вне зависимости от природы используемой мембраны.

После введения SO_2 уравнение суммарной реакции: $3\text{S}^{2-} + 3\text{SO}_2 + 2\text{Bi} \leftrightarrow \text{Bi}_2\text{S}_3 + 3\text{O}_2$. При этом следует резкое увеличение ЭДС. Как видно из представленного уравнения реакции, происходит выделение побочного продукта – кислорода. Однако, благодаря постоянному пропусканию через ячейку инертного газа, кислород из реакционной среды удаляется.

Тогда ЭДС в момент ввода диоксида серы:

$$E_2 = \frac{2,3RT}{6F} \lg \frac{P_{\text{эс}}}{P_{\text{рз}}^3} \quad (4)$$

Величина отклика (сигнала):

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{RT}{6F} \ln \frac{P_{\text{тз}}^{3/2}}{P_{\text{рз}}^3}; \quad (5)$$

$$\Delta E = \frac{2,3RT}{6F} \lg \frac{10^{-23}}{10^{-153}} > 0.$$

Подтверждается факт, что ЭДС в процессе детектирования SO_2 растёт и не зависит от парциального давления паров серы над электродом сравнения.

На основании большого объёма статистических данных о детектировании исследуемых газов в рабочем температурном интервале использованных твёрдых электролитов были построены калибровочные зависимости, которые в соответствии с уравнением Нернста представляют собой прямые в координатах «сигнал датчика (максимальное отклонение от базовой линии) – логарифм концентрации серосодержащего газа» (рис. 4, 5).

Калибровочные зависимости для обоих серосодержащих газов имеют аналогичный характер. При определённых концентрациях серосодержащих газов калибровочные зависимости претерпевают излом. Понижение чувствительности ($\Delta E/\Delta \lg C$) датчика в области низких концентраций связано с наличием в ячейке малого остаточного количества анализируемого газа.

Определение минимальной концентрации, которую возможно детектировать с помощью датчика, проводили путём разбавления газа. В интервале концентраций $3,0 \cdot 10^{-8}$ до $1,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л наблюдается воспроизводимая зависимость сигнала датчика. При большем разбавлении сигналы датчика воспроизводятся слабо и не подчиняются теоретической модели. Одной из причин может являться увеличение погрешности при многократном разбавлении газа. В этой связи гетерогенный процесс на границе «рабочий электрод – детектируемый газ» оценивается с точки зрения формальной кинетики.

Интегральный порядок процессов на измерительных электродах определяли, изучая зависимость сигнала датчиков (ΔE) от времени при детектировании обоих газов. В случае детектирования сероводорода в области концентраций, отвечающих калибровочной кривой (рис. 4), электродная реакция на измерительном электроде описывается уравнением

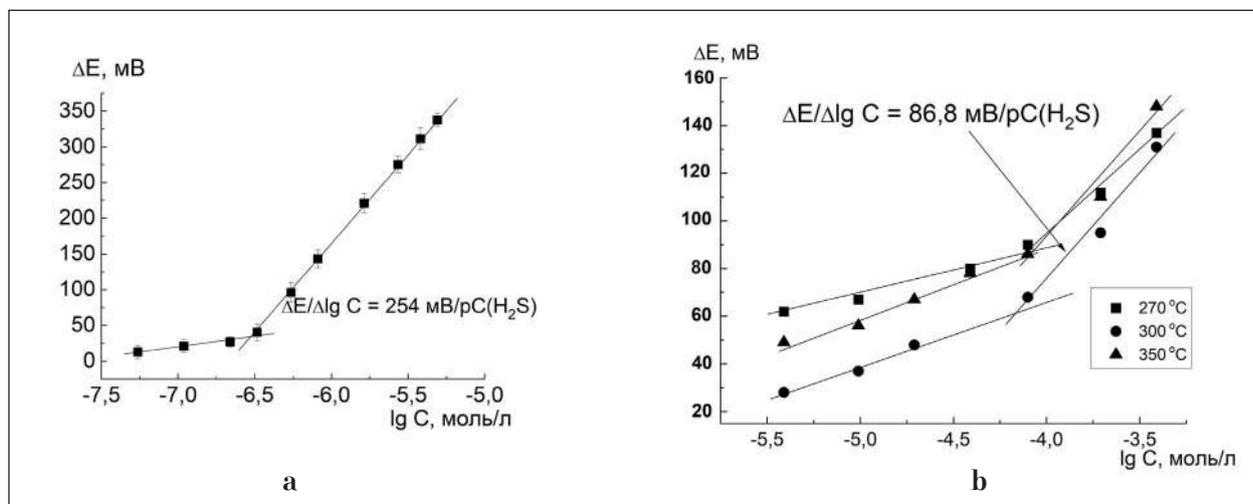


Рис. 4. Калибровочные зависимости на сероводород для: а) датчика с мембраной $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ при температуре $445 \text{ }^\circ\text{C}$; б) датчика с мембраной $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ в области температур $270 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 4. Calibration dependences on hydrogen sulfide for: a) sensor with membrane $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ mol. \% Yb}_2\text{S}_3$ in temperature $445 \text{ }^\circ\text{C}$; b) sensor with membrane $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ mol. \% Yb}_2\text{S}_3$ in the temperature range $270 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$

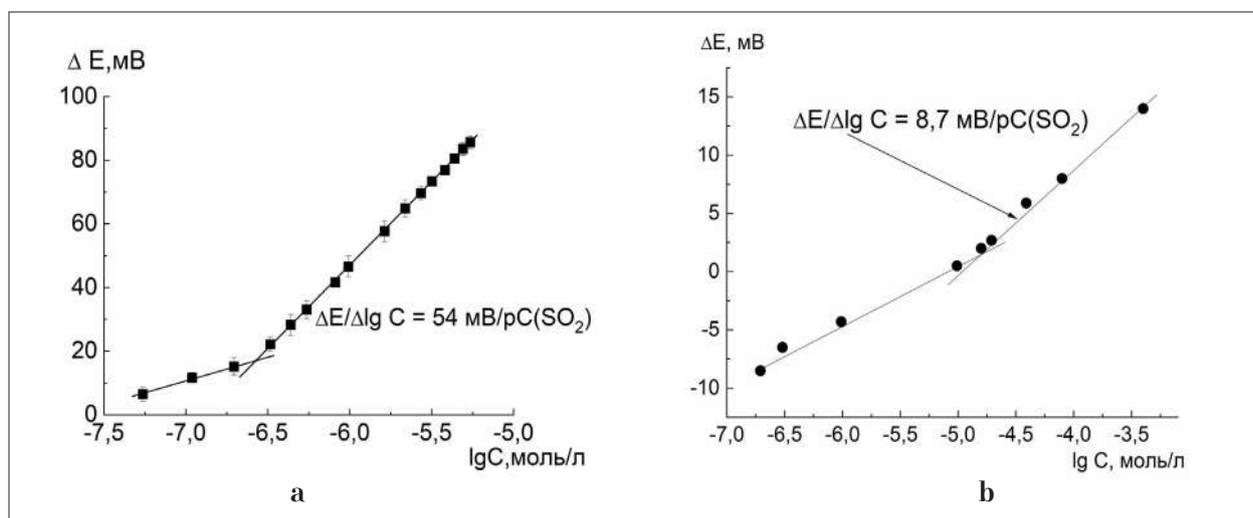


Рис. 5. Калибровочные зависимости на диоксид серы для: а) датчика с мембраной $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ при температуре $445 \text{ }^\circ\text{C}$; б) датчика с мембраной $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 5. Calibration dependencies on sulfur dioxide for: а) sensor with membrane $\text{CaY}_2\text{S}_4 - 4 \text{ mol. \% Yb}_2\text{S}_3$ in temperature $445 \text{ }^\circ\text{C}$; б) sensor with membrane $\text{CaYb}_2\text{S}_4 - 4 \text{ мол. \% Yb}_2\text{S}_3$ in temperature $300 \text{ }^\circ\text{C}$

реакции первого порядка, константа скорости которой равна $k_{\text{H}_2\text{S}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$.

Механизм гетерогенных электродных реакций достаточно сложен [10]. Кроме собственно электрохимической реакции возможны процессы, протекающие непосредственно в газовой фазе, процессы на границе «электрод – газ», а также диффузия ионов серы через твёрдоэлектролитную мембрану.

В таблице 3 представлены возможные механизмы гетерогенного электродного процесса датчика сероводорода.

В соответствии с механизмом № 1 реакцией первого порядка является реакция термического разложения сероводорода, а в соответствии с механизмом № 2 реакцией первого порядка является адсорбция сероводорода на поверхности электрода. Однако константа скорости термического разложения сероводорода ($k_{\text{разл.}} = 0,117 \text{ c}^{-1}$) больше константы скорости адсорбции сероводорода ($k_{\text{H}_2\text{S}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$), что позволяет считать лимитирующей стадией адсорбции сероводорода, а наиболее вероятным механизм № 2.

Таблица 3 / Table 3

Возможные механизмы гетерогенного электродного процесса датчика сероводорода
Possible mechanisms of the heterogeneous electrode process of the hydrogen sulfide sensor

Механизм № 1 / Mechanism No. 1	Механизм № 2 / Mechanism No. 2
1) термическое разложение детектируемого газа thermal decomposition of the detected gas: $H_2S \leftrightarrow H_2 + 1/2 S_2$	1) адсорбция сероводорода на поверхности электрода / adsorption of hydrogen sulfide on the electrode surface: $H_2S \leftrightarrow H_2S_{адс.}$
2) адсорбция серы на графитовом электроде adsorption of sulfur on a graphite electrode: $1/2 S_2 \leftrightarrow S_{адс.}$	2) собственно электрохимическая реакция на измерительном электроде / actual electrochemical reaction at the measuring electrode: $H_2S_{адс.} + 2\bar{e} \leftrightarrow S^{2-} + 2H_{адс.}$
3) собственно электрохимическая реакция на измерительном электроде / actual electrochemical reaction at the measuring electrode: $S_{адс.} + 2\bar{e} \leftrightarrow S^{2-}$	3) переход адсорбированного водорода в газовую фазу / transition of adsorbed hydrogen to the gas phase: $2H_{адс.} \leftrightarrow H_2$
4) ионный перенос / ionic transfer: $S^{2-}_{изм.} \leftrightarrow S^{2-}_{срав.}$	

Таблица 4 / Table 4

Возможные механизмы гетерогенного электродного процесса датчика диоксида серы
Possible mechanisms of the heterogeneous electrode process of the hydrogen sulfide sensor

Механизм № 1 / Mechanism No. 1	Механизм № 2 / Mechanism No. 2
1) термическое разложение детектируемого газа thermal decomposition of the detected gas: $SO_2 \leftrightarrow O_2 + 1/2 S_2$	1) адсорбция диоксида серы на поверхности электрода / adsorption of hydrogen sulfide on the electrode surface: $SO_2 \leftrightarrow SO_{2адс.}$
2) адсорбция серы на графитовом электроде adsorption of sulfur on a graphite electrode: $1/2 S_2 \leftrightarrow S_{адс.}$	2) собственно электрохимическая реакция на измерительном электроде / actual electrochemical reaction at the measuring electrode: $SO_{2адс.} + 2\bar{e} \leftrightarrow S^{2-} + 2O_{адс.}$
3) собственно электрохимическая реакция на измерительном электроде / actual electrochemical reaction at the measuring electrode: $S_{адс.} + 2\bar{e} \leftrightarrow S^{2-}$	3) переход адсорбированного водорода в газовую фазу / transition of adsorbed hydrogen to the gas phase: $2O_{адс.} \leftrightarrow O_2$
4) ионный перенос / ionic transfer: $S^{2-}_{изм.} \leftrightarrow S^{2-}_{срав.}$	

Путём определения кинетических параметров для датчика выявлено, что реакция детектирования диоксида серы протекает как реакция второго порядка, константа скорости которой $k_{SO_2} = 5,73 \cdot 10^{-2} \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с})$.

Возможные механизмы гетерогенного электродного процесса датчика диоксида серы приведены в таблице 4.

При рассмотрении многостадийных механизмов детектирования диоксида серы единственным элементарным актом, отвечающим второму порядку, является реакция десорбции побочного продукта – кислорода – с поверхности электрода. Поэтому при определении содержания SO_2 лимитирующей нужно считать реакцию десорбции кислорода. Проведённое кинетическое исследование позволило объяснить различие в чувствительности датчиков сероводорода и диоксида серы. Большая чувствитель-

ность датчиков сероводорода ($\Delta E/\Delta \lg C = 66,9-90,0 \text{ мВ}$) присуща реакции первого порядка, меньшая ($\Delta E/\Delta \lg C = 6,8-11,2 \text{ мВ}$) характерна для датчиков SO_2 , электродный процесс в котором описывается уравнением реакции второго порядка.

Заключение

Рассмотрена связь величины сигнала датчика с электродными реакциями на рабочем электроде с учётом парциальных давлений над его составными частями и обоснован характер сигналов при детектировании H_2S и SO_2 . Построены калибровочные зависимости для обеих серопроводящих твёрдоэлектролитных мембран. Выявлено, что калибровочные кривые для обоих газов претерпевают излом. Сделано предположение, что причина низкой чувствительности датчиков в области

парциальных давлений серы $< 10^{-10}$ атм. имеет кинетическую природу.

Кинетический подход к гетерогенному процессу на границе «рабочий газ – твёрдый электролит» показал, что при детектировании газа, содержащего сероводород, лимитирующей стадией является реакция адсорбции сероводорода на поверхности рабочего электрода (реакция 1-го порядка), а при определении содержания диоксида серы скорость определяет реакция десорбции побочного продукта – кислорода (реакция 2-го порядка).

Полученная информация позволяет объяснить большую чувствительность датчика при детектировании сероводорода и на порядок меньшую чувствительность при детектировании диоксида серы.

Таким образом, результаты исследования позволили наметить путь дальнейшего улучшения рабочих характеристик датчиков:

- процесс детектирования сероводорода, лимитированный стадией адсорбции, необходимо проводить при температурах, близких к нижней границе электрохимического интервала;

- для увеличения чувствительности датчика на диоксид серы необходимо предпринимать меры по увеличению скорости десорбционных процессов, например, увеличивать температуру детектирования;

- после каждого измерения промывать ячейку потоком аргона со скоростью, большей скорости протока газа во время детектирования.

Результаты работы показали, что для детектирования H_2S и SO_2 более перспективным представляется использование серопроводящего твёрдого электролита $CaY_2S_4 - x Yb_2S_3$ ($x = 0-16$ мол. %), обеспечивающего чувствительность датчика почти на порядок большую, чем использование твёрдого электролита $CaYb_2S_4 - x Yb_2S_3$ ($x = 0-12$ мол. %).

References

1. Stolberg F.V. Ecology of the city. Kiev: Libra, 2000. 464 p. (in Russian).

2. Tarasova N.P., Zanin A.A., Sobolev P.S., Pavlyuk A.N. "Green" methods for recycling of sulfur-containing waste // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 100–105 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-100-105

3. Ismagilov F.R. Ecology and new technologies of purification hydrogen sulfide-containing gase. Ufa: Ekologiya, 2000. 214 p. (in Russian).

4. Levchenko A.B., Leonova L.S., Dobrovolskiy Yu.A. Solid state electrochemical sensors of active gase // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. 2008. No. 1. P. 66–71 (in Russian).

5. Kosheleva E.V., Kalinina L.A., Ananchenko B.A., Ushakova Yu.N., Zobnin R.M. Prospects of using $CaY_2S_4 - Yb_2S_3$ within sensors sensitive towards sulfur-containing gases // Russian Journal of Electrochemistry. 2015. V. 51. No. 6. P. 546–550. doi: 10.1134/S1023193515060129

6. Koshurnikova (Kosheleva) E.V., Kalinina L.A., Korzhova O.V., Pentin M.A. Using of complex sulfide phases $CaY_2S_4 - Yb_2S_3$ as ion-selective membrane for sensor of potentiometric type on hydrogen sulfide // XV Mezhdunar. Soveshchaniye "Technology improvement of galvanic coating: tez. dokl. Kirov: Tet-a-tet, 2012. P. 59–60 (in Russian).

7. Koshurnikova (Kosheleva) E.V., Kalinina L.A., Ushakova Yu.N., P'yankova M.V., Murin I.V. Synthesis, structure, and physico-chemical properties of sulfide ceramics $CaY_2S_4 - Yb_2S_3$ // Russian Journal of Electrochemistry. 2013. V. 49. No. 8. P. 769–775. doi: 10.1134/S1023193513080107

8. Ananchenko B.A., Myakishev A.O., Kalinina L.A., Kosheleva E.V., Murin I.V. Effect of composition on character of defect formation and ion transport in $(1-x)[Ca(1-y)Yb(y)(2+)]Yb(2)(3+)S_4 - \delta - Yb(2)S(3)$ phases // Russian Journal of Electrochemistry. 2017. V. 53. No. 8. P. 799–807.

9. Koshurnikova (Kosheleva) E.V., Kalinina L.A., Ushakova Yu.N. Using of ceramic electrolytes $CaY_2S_4 - Yb_2S_3$ as part of the sensors on sulfur-containing gases (H_2S , SO_2) // The actual problems of solid state physics: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch. konf. Minsk: Kovcheg, 2013. V. 3. P. 353–354 (in Russian).

10. Panchenkov G.M., Lebedev V.P. Chemical kinetics and catalysis. Moskva: Himiya, 1985. 592 p. (in Russian).

**Rare species of plants and fungi in the “Koigorodskiy”
National Park (Komi Republic, Russia)**

© 2022. S. V. Degteva¹ ORCID: 0000-0003-3641-6123, Yu. A. Dubrovskiy² ORCID: 0000-0002-7219-054X,
M. V. Dulin² ORCID: 0000-0003-0237-421X, G. V. Zheleznova² ORCID: 0000-0002-8208-0838,
V. A. Kanev² ORCID: 0000-0002-6284-0385, D. V. Kirillov² ORCID: 0000-0002-6577-693X,
D. A. Kosolapov² ORCID: 0000-0002-3894-8177, D. I. Kudreavtzeva² ORCID: 0000-0002-6902-5551,
M. A. Palamarchuk² ORCID: 0000-0001-8538-969X, T. N. Pystina² ORCID: 0000-0003-2215-4724,
N. A. Semenova² ORCID: 0000-0002-4356-352X, T. P. Shubina² ORCID: 0000-0001-6166-7325,
¹FRC Komi SC UB RAS,

24, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

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: degteva@ib.komisc.ru

The importance of the “Koigorodskiy” National Park (Komi Republic) for conservation of protected plants and fungi key habitats is demonstrated for the first time. By now, we registered here 367 occurrences of 32 rare species of plants and fungi, included in the Red Data Book of the Komi Republic. Among them, 11 taxons of plants (7 species of vascular plants and 4 species of bryophytes), and 21 taxons of fungi (9 species of fungi, 11 species of lichens and 1 species of lichenicolous fungi) were found. Three species of vascular plants and nine taxons of lichens require monitoring of their nature populations and are included in the Appendix 1 to the Red Data Book of the Komi Republic. Our results confirm the priority of the Koigorodskiy National Park for conservation of biological diversity in the ecotone zone between the middle and southern taiga, and for protection of rare plants and fungi key habitats.

Keywords: biodiversity, bryophytes, fungi, key habitats, lichens, nature protected areas, vascular plants.

УДК 581.52

**Редкие виды растений и грибов
национального парка «Койгородский»
(Республика Коми, Россия)**

© 2022. С. В. Дёгтева¹, чл.-корр. РАН, директор,
Ю. А. Дубровский², к. б. н., н. с., М. В. Дулин², к. б. н., н. с.,
Г. В. Железнова², д. б. н., в. н. с., В. А. Канев², к. б. н., н. с.,
Д. В. Кириллов², к. б. н., н. с., Д. А. Косолапов², к. б. н., н. с.,
Д. И. Кудрявцева², вед. инженер, М. А. Паламарчук², к. б. н., с. н. с.,
Т. Н. Пыстина², к. б. н., с. н. с., Н. А. Семенова², м. н. с.,
Т. П. Шубина², к. б. н., с. н. с.,
¹ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,

167928, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24,

²Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167928, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: degteva@ib.komisc.ru

Впервые продемонстрирована значимость национального парка «Койгородский» (Республика Коми) для сохранения ключевых местообитаний охраняемых растений и грибов. В национальном парке зарегистрированы 367 находок 32 видов охраняемых растений и грибов, занесённых в Красную книгу Республики Коми. Среди них 11 таксонов растений (7 видов сосудистых растений и 4 – бриофитов) и 21 таксон грибов (9 видов настоящих грибов, 12 – лишайников и 1 вид лишенизированных грибов). Найдены 3 вида сосудистых растений и 9 таксонов лишайников, нуждающихся в постоянном контроле численности в природе и включённых в приложение 1 к региональной Красной книге. Три

представителя царства грибы (*Sarcosoma globosum*, *Lobaria pulmonaria*, *Tuckneraria laureri*) охраняются на федеральном уровне. Выявлены популяции *Dendroscosticta wrightii*, *Usnea longissima*, *Neckera pennata* – видов, которые в ряде стран Европы в результате усиления антропогенного пресса на экосистемы стали малочисленными.

Ключевые слова: биологическое разнообразие, грибы, ключевые местообитания, лишайники, мохообразные, особо охраняемые природные территории, сосудистые растения.

Recently, the problem of studying and preserving biological diversity becomes crucial due to the global ecological crisis. In the second half of the XX century, people realized the growing trend of a steadily increasing intensity of the biological resources use, which causes the threat of an ecosystem biological diversity decrease. The need to preserve the diversity of life at various levels of its organization from genetic to landscape was claimed by the resolutions of the UN Conference on Sustainable Development, Rio de Janeiro, 1992 (<https://www.un.org/ru/conferences/environment/rio1992>).

The creation of Nature Protected Areas (NPA) networks is considered to be the most effective way to preserve natural ecosystems [1]. Since the late 1950s, systematic research has been conducted in the Komi Republic on the formation of a NPA system. The Republic has one of the most extensive networks of protected areas in the North-West of Russia, including four federal objects, and 228 regional reserves and nature monuments [2]. The total area of the NPAs is about 5.47 mln ha (13.1% of the total Komi Republic area). The local system of NPAs is of great value for the conservation of habitats of rare species listed in the “Red Data Book of the Komi Republic” [3] and the “Red Data Book of the Russian Federation” [4, 5].

The Koigorodskiy National Park with an area of 56700 ha was created in 2019 at the south-west of the Komi Republic. It is located in the ecotone area between middle and southern taiga [2] and protects a large array of undisturbed natural boreal forests [6]. Pristine forest ecosystems have high diversity of fungi, lichens, invertebrates, and birds [7, 8]. So, such areas are the key habitats for populations of rare species. Therefore, for the Koigorodskiy National Park, we expected many findings of rare species, including protected taxons, which have the northern boundaries of their areas in the region.

At the time the national park was founded, information about its biological diversity was fragmentary. There are still no data on the flora and vegetation diversity. In the literature, one can find only information about the diversity of vascular plants and lichens in the adjacent territories of the southern regions of the Komi

Republic. In 2021, specialists of the IB Komi SC UrB RAS began systematic studies of flora, lichen- and mycobiota on the territory of Koigorodskiy National Park. The main goal of the research was to identify the habitats of protected taxons listed in the “Red Data Book of the Komi Republic” [3] and the “Red Data Book of the Russian Federation” [4]. The article is devoted to the characteristics of habitats and populations of rare species.

Materials and methods

The Koigorodskiy National Park is located in the eastern part of East-European Plain (Figure) on the watershed of the largest European rivers – the Volga (Caspian Sea basin) and the Northern Dvina (White Sea basin). Its southern border coincides with the administrative boundary between the Komi Republic and the Kirov region. In the Kirov region, the Tulashor cluster site (area 17,815 ha) of the Nurgush State Nature Zapovednik adjoins the boundaries of the National Park.

Tectonically, the Koigorodskiy National Park is confined to the Russian Platform overlain by deposits of the Jurassic and Cretaceous periods [9]. Deposits of the Quaternary period are fluvio-glacial pebbles and sands. The most of the territory is a part of the Northern Uvaly – an elevated denudation-accumulative gently hilly plain, dissected by the sources of rivers. The elevation ranges from 200 to 220 (240) m [9]. The climate is intracontinental, temperate [9]. The winter is cold and long with a short frost-free period. The summer is cool and short. The precipitation is reduced (700–850 mm/year) and falls mainly in the warm season. The amount of annual precipitation exceeds the annual land evaporation (500–530 mm/year). This contributes to the formation of a dense hydrographic network. The national park watercourses belong to the basins of the Suran, Mytets, Fedorovka and Letka rivers. Rivers have a mixed feeding with a predominance of snow one, and the waters are hydrocarbonate-calcium with a salinity of 250 mg/dm³.

According to botanical-geographical zoning, the study area is in the Kama-Pechora-West

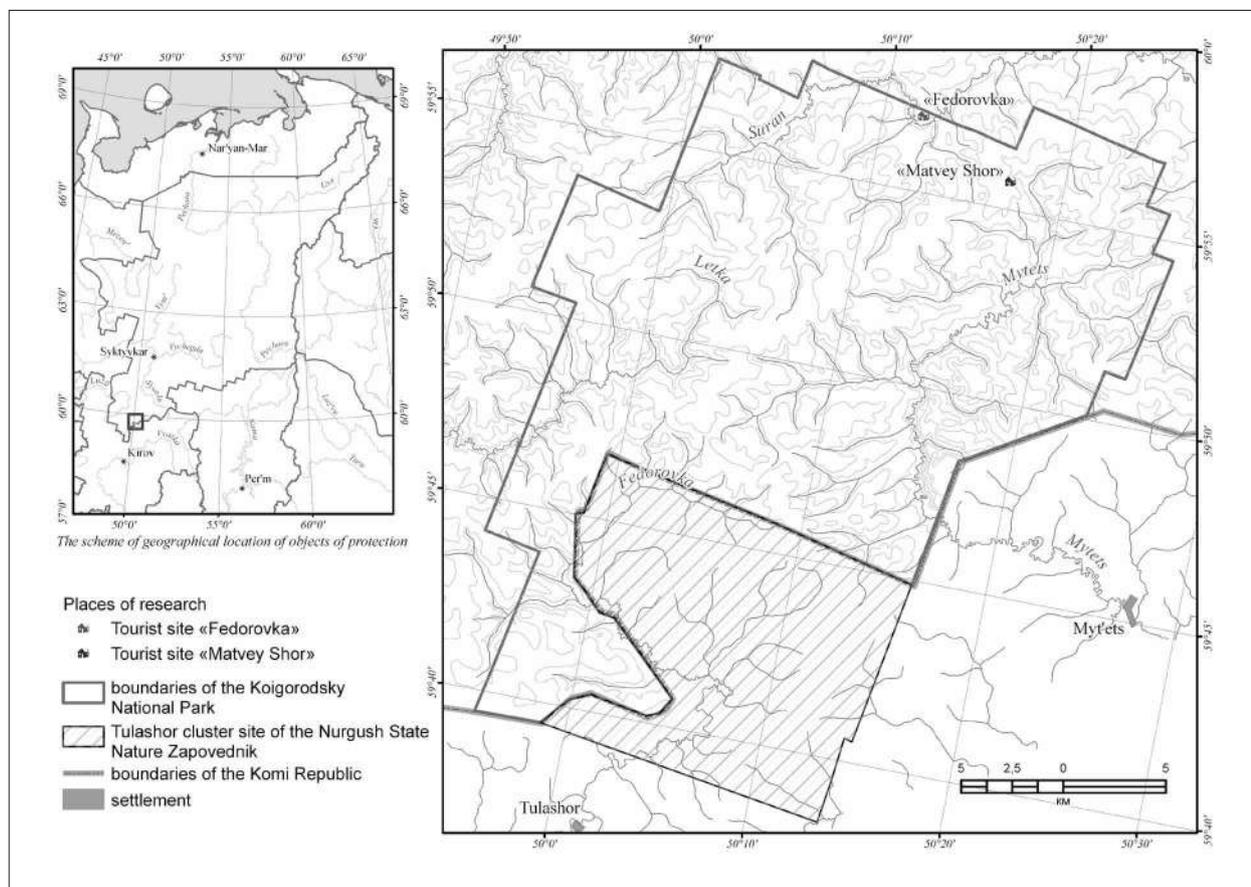


Fig. Places of research

Ural subprovince of the East-European Plain taiga province of the Eurasian boreal area [10]. Forest is a dominant type of vegetation [6] and covers about 98% of the territory. Mixed aspen and birch stands are common at the watersheds and cover 42 and 24% of the afforested area. Coniferous forests are mainly presented by spruce stands formed by *Picea obovata* Ledeb., often with co-dominant *Abies sibirica* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh. and *Populus tremula* L. Spruce forests cover 32% of the afforested area.

Tree stands are old and have medium density (0.7). An average yield class of the stands is II.5, ranged from III.4 in spruce stands to I.7 in aspen stands. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands are rare and cover about 2% of the afforested area. There are large arrays of wind fallen stands on the territory of the National Park. Bogs are common in the wet depressions, meadows and willows – in the river valleys. These types of vegetation have a small area.

Podzolic soils are formed on loamy bedrocks under green moss spruce forests. Ferruginous podzols are developed on drained sandy bedrocks under lichen and green moss pine forest. Under the canopy of spruce and aspen forests of her-

baceous type sod-podzolic soils are developed, in river valleys – alluvial sod and alluvial sod-gley soils. In areas of watershed with stagnant moisture under the canopy of dark coniferous forests dog-podzolic and peat-podzolic-gley soils are dominate [9].

The inventory of the biological diversity of plants and fungi was carried out in June–September 2021 in the northern part of the Koigorodskiy National Park (the vicinity of the “Fedorovka” and “Matvey Shor” tourist sites). The samples of plants, fungi and lichens were collected by route method according to the standard approach [11] in all types of plant communities found at the study sites. The length of radial routes was up to 3–4 km. Vascular plants floras were studied using standard local flora approaches [12, 13]. To identify the diversity of mosses, fungi and lichens, various substrates were examined: trunks and branches of living and dead trees, stumps, decks, soil, etc. The processing and determination of the collections was carried out in laboratory conditions using the comparative morphological, anatomical and morphological methods generally accepted in biology. Species names of vascular plants are

given according the *Plants of the World Online* source (<https://powo.science.kew.org/>). The size and names of moss families, genera and species are given according to the list of bryophytes from Europe, Macaronesia and Cyprus [14]. The nomenclature, volume of taxa, taxonomic position of lichens and associated fungi are indicated from the MycoBank Database (<http://www.mycobank.org>). The taxonomy and nomenclature of fungi taxa are given in accordance with the recommendations of the Index Fungorum resource (www.indexfungorum.org).

Results and discussion

The regional Red Data Book contains 532 taxa, including 150 species of fungi and lichens, 314 species of plants and 68 species of invertebrates and animals. The distribution of species listed in the third edition of the “Red Data Book of the Komi Republic” [3] by categories of rarity status is shown in the Table.

Analysis of the plants and fungi rare species representation within the regional NPA network showed that 86% of rare species are presented in the NPAs. At the same time, 13 species of fungi (including 5 lichen species) and 54 taxons of plants (5 species of algae, 12 bryophytes, and 37 vascular plants) are not protected in NPAs. The main reason is that the regional NPA network does not includes all types of landscapes of the Komi Republic [2]. The establishment of the Koigorodsky National Park in 2019 filled one of the gaps in the regional NPA network and ensured the preservation of the moraine plain landscapes with a silty mantle loams of the ecotone area between the middle and southern taiga subzones.

We found 32 populations of protected plants and fungi, including 11 taxa of plants (7 vascular

and 4 bryophytes) and 21 taxa of fungi (9 fungi and 12 lichens). The dataset on rare species with 367 occurrences was published in GBIF (<https://www.gbif.org/dataset/d2fa65c0-4e89-4763-af31-29bf09183a5d>). Information about rare species listed in the Red Data Book of the Komi Republic is contained in 43 more data sets also published in GBIF. The largest of them was prepared by specialists of the IB Komi SC UrB RAS and contains records of 8893 occurrences of 470 species [15]. Comparison with other GBIF data showed that our information significantly complete the knowledge on protected rare species in the Komi Republic.

All the protected vascular plant species has a category of rarity status 3: *Cinna latifolia* (Trevir. ex Göpp.) Griseb., *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott, *Anemonoides ranunculoides* (L.) Holub, *Ranunculus ficaria* L., *Thalictrum aquilegifolium* L., *Tilia cordata* Mill., *Viola selkirkii* Purs ex Goldie. Moreover, we found three species included in the Annex 1 to the Red Data Book of the Komi Republic: *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, and *Viola mirabilis* L. The most interesting findings are *Thalictrum aquilegifolium*, *Anemonoides ranunculoides*, and *Ranunculus ficaria* (Ranunculaceae). *Thalictrum aquilegifolium* was previously known only from two sites in the southern part of the Komi Republic. There are no new herbarium specimens of this species in the SYKO during the last 50 years and there are no the species findings at other regional NPAs. Moreover, the previously collected samples were vegetative individuals. Our findings confirm the emergence of this species in the Komi Republic. Its population establishes the Suran floodplain, between herbaceous meadow and the edge of mixed forest. We found about 300 individuals growing along the river bank. *Thalictrum aquilegifolium*

Table

Distribution by category of rarity status of species of fungi and plants, included in the “Red Data Book of the Komi Republic” [3]

Group of organisms	Category of rarity status						Total
	0	1	2	3	4	5	
Kingdom Fungi							150
Fungi	0	0	1	55	9	0	65
Lichens	2	17	12	48	6	0	85
Kingdom Plants							314
Algae	0	0	0	10	0	0	10
Bryophytes	0	0	12	52	7	0	71
Vascular plants	0	16	43	144	30	0	233

Note. The categories of species rarity status are given according to the system adopted in the “Red Data Book of the Russian Federation” [4].

is included in the “Red Data Book of the Kirov region” [16], and was recorded from the Tulashor cluster, Nurgush State Nature Reserve.

Anemonoides ranunculoides and *Ranunculus ficaria* were also found in the Suran floodplain grass-sedge communities, where the species grown in the silted open hollows. The populations are large and consist of more than 500 individuals, growing along the river course. There are the northern borders of the species ranges in the Komi Republic, and their occurrences are rare. Earlier, the species were protected only in the Pechoro-Ilychsky State Nature Reserve. Population of *Cinna latifolia* (Poaceae) was found in the riverine spruce forest in the wet hollow. The population is small – about 30 individuals. This species is sporadically distributed in the Komi Republic and protected in the Pechoro-Ilychsky State Nature Reserve and three landscape regional reserves. On the Vychegda Plain, *Cinna latifolia* is protected only in the Koigorodskiy National Park.

Fern *Dryopteris filix-mas* (Dryopteridaceae) was recorded in the mixed forest of herbaceous type. The population is small – about 50 individuals. In the Komi Republic, the species rarely grows in the forests of the Northern and Subpolar Urals, on a plain – in the southern part of the middle taiga in the old growth mixed forests of herbaceous type. Many of the species’ habitats are out of the limits of NPA. A single plant of *Tilia cordata* (Tiliaceae) of bushy form and 3 m height was found in the floodplain mixed forest at a slope to the stream Matvey Shor. In the Komi Republic this species is on the northern boundary of its range. Its populations are growing in the basins of the rivers Sysola, Luza, Letka, and Kobra. The populations are small. The species is under protection in one botanical reserve and two nature monuments.

Numerous populations of *Viola selkirkii* (Violaceae) were found in the old growth mixed forests of herb-green moss type. This species prefers south-west of the Komi Republic and sometimes grow in Suburals. *Viola selkirkii* is well provided with territorial protection in the regional NPAs. In addition to the Koigorodskiy National Park, it is under protection in the Pechoro-Ilychsky State Nature Reserve and six local reserves. All rare species of vascular plants, found in the national park, belong to southern latitudinal elements (nemoral-boreal and nemoral) and may be suggested as relics of the Holocene climatic optimum.

Two species are in the “Red Data Book of the Kirov Region” [16]: *Corallorhiza trifida* Chatel.

and *Neottia cordata* (L.) Rich. Single plants of *Corallorhiza trifida* were noted at the fen. *Neottia cordata* was recorded from mixed and spruce forests of the green moss type. Analysis of the data on the flora of the Tulashor cluster, Nurgush State Nature Reserve [17, 18] revealed that it contains 12 species of the «Red Data Book of the Komi Republic» [3]: *Carex pseudocyperus* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W.P.C. Barton, *Dactylorhiza traunsteineri* (Saut. ex Rchb.) Soó, *Dryopteris cristata* (L.) A. Gray, *Epipogium aphyllum* Sw., *Iris sibirica* L., *Monotropa hypopitys* L., *Polygala comosa* Schkuhr, *Potentilla erecta* (L.) Raeusch., *Thelypteris palustris* Schott, *Viola collina* Besser, and *Viscaria vulgaris* Röhl. They will probably be found on the territory of the Koigorodskiy National Park during further research. Most of these taxons are not under protection in the NPAs of the Komi Republic.

Neckera pennata Hedw. and *Schistostega pennata* (Hedw.) F. Weber et D. Mohr., rare moss species included in the “Red Data Book of the Komi Republic” [3] with a status 3, are mainly concentrated in the old-growth forests and floodplain habitats of the Koigorodskiy National Park. Rarity of *Neckera pennata* and *Schistostega pennata* in the Komi Republic is mainly due to natural reasons. These species have narrow ecological range and is near the northern border of their area. *Neckera pennata* is rare in many European countries [19] and 52 regions of Russia. This species is typical for the zone of broad-leaved and coniferous-broad-leaved forests, where its populations had significantly decreased since the middle of the 20th century. In the Komi Republic, *Neckera pennata* grows mainly in the ecotopes with high air humidity, usually old-growth aspen forests. In most cases, the moss is confined to the bark of old aspen trees, climbing 3–4 m on trunks.

The species can be of interest as an indicator of aspen forests that have not been disturbed by felling or fires for a sufficiently long time. 166 species occurrences are known in the Komi Republic, of which more than a half (52%) was found in the southern part of the region in the southern and middle taiga. In the Koigorodskiy National Park, we registered 12 habitats of *Neckera pennata*. The species is protected in the Pechoro-Ilychsky State Nature Reserve, and five regional reserves. *Neckera pennata* is included in the “Red Data Book of Kirov Region” [16], and found in the Tulashor cluster, Nurgush State Nature Reserve [18].

Schistostega pennata was found in a wooded valley of stream on fine sand under the roots of

fallen tree. This small annual moss is adapted to grow in shaded habitats. In Russia, *Schistostega pennata* is sporadically found in the European part, Siberia and the Far East. The species is listed in the Red Data Books of 19 regions of Russia. There are 21 known occurrences of this species in the Komi Republic, including two in the Koigorodskiy National Park. The species was recorded in the northern, middle and southern taiga, as well as in the Northern Urals. Until recently, *Schistostega pennata* was protected only in the Pechoro-Ilychskiy State Nature Reserve.

New habitats of liverworts *Lophozia ascendens* (Warnst.) R.M. Schust. and *Scapania apiculata* Spruce were found in the National Park. The species are included in the “Red Data Book of the Komi republic” [3] with status 3. *Lophozia ascendens* was found in old windfall site in spruce-birch forest of hair-cap moss-sphagnum type, and in mixed spruce-aspen forest of dwarf shrub-bilberry-green moss association. The species inhabits rotting wood. The species is found sporadically in the taiga zone of the Komi Republic. It is under protection in the NPAs of federal (Pechoro-Ilychskiy State Nature Reserve and Yugyd va National Park) and local (regional reserves) levels. *Scapania apiculata* was found in the same habitats as *Lophozia ascendens*, and in the reed-dwarf shrub-fern-green moss aspen forest. The species is found sporadically in the middle taiga of the Komi Republic (basins of the Luza, Sysola, and Vychegda rivers, and upper course of the Pechora river), and is under protection in the Pechoro-Ilychskiy State Nature Reserve and two local reserves.

In the Koigorodskiy National Park, we found 9 species of fungi included in the “Red Data Book of the Komi Republic” [3]: *Leucocortinarius bulbiger* (Alb. et Schwein.) Singer, *Microstoma protractum* (Fr.) Kanouse, *Onnia tomentosa* (Fr.) P. Karst., *Pluteus umbrosus* (Pers.) P. Kumm., *Rigidoporus crocatus* (Pat.) Ryvardeen, *Sarcosoma globosum* (Schmidel) Casp., *Thelephora palmata* (Scop.) Fr., *Trichoderma nybergianum* (T. Ulvinen & H.L. Chamb.) Jaklitsch & Voglmayr. It counts 14% from total number of fungi species protected in the region. *Onnia tomentosa* and *Thelephora palmata* have status 4, other species – status 3. One species, *Sarcosoma globosum*, is included in the “Red Data Book of Russian Federation” [4], with the status 2. All species were recorded earlier in the other federal NPAs of the Komi Republic: *Leucocortinarius bulbiger*, *Pluteus umbrosus*, and *Trichoderma nybergianum* in the Yugyd va National Park; *Leucocortinarius bulbiger*, *Onnia tomentosa*, *Phlebia coccineofulva*,

Rigidoporus crocatus, *Sarcosoma globosum*, and *Thelephora palmate* in the Pechoro-Ilychskiy State Nature Reserve; *Microstoma protractum* was found in the federal reserve Paraskiny lakes.

Onnia tomentosa and *Phlebia coccineofulva* prefer pristine and old-growth forests. Populations of *Leucocortinarius bulbiger* and *Pluteus umbrosus* are on the northern border of their ranges, and their emergence indicates the nemoral character of the microbiota. *Leucocortinarius bulbiger* was collected in the fern spruce forest. Fruiting bodies of *Pluteus umbrosus* established mainly the large fallen wood of aspen. In the northern part of the National Park, where old-growth aspen and mixed forests are widespread, optimal conditions are formed for this species. In the Komi Republic, there is an eastern border of the *Trichoderma nybergianum* range. In the Koigorodskiy National Park, the species was collected in the fern spruce forest. *Sarcosoma globosum* is found sporadically in the boreal zone of the Komi Republic. The species emergence indicates the intact state of forests in the Koigorodskiy National Park. Four rare species: *Leucocortinarius bulbiger*, *Microstoma protractum*, *Rigidoporus crocatus*, and *Trichoderma nybergianum*, are found in the Tulashor cluster, Nurgush State Nature Reserve [20].

As a result of lichenological studies in the Koigorodskiy National Park, new habitats of 12 species from the “Red Data Book of the Komi Republic” [3] were found: *Cetrelia olivetorum* (Nyl.) W.L. Culb. & C.F. Culb., *Coenogonium luteum* (Dicks.) Kalb & Lücking, *Dendricosticta wrightii* (Tuck.) B. Moncada & Lücking, *Heterodermia speciosa* (Wulfen) Trevis., *Usnea longissima* Ach. (= *Dolichousnea longissima* (Ach.) Articus) (status 1); *Cheiromycina flabelliformis* B. Sutton, *Cliostomum leprosum* (Räsänen) Holien & Tønsberg, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm., *Pertusaria hemisphaerica* (Florke) Erichsen (= *Varicellaria hemisphaerica* (Flörke) I. Schmitt & Lumbsch), *Sclerophora coniophaea* (Norman) J. Mattsson et Middelb. (= *S. pallida* (Pers.) Y.J. Yao & Spooner), *Tuckneraria laureri* (Kremp.) Randle & A. Thell (status 3); *Multi-clavula mucida* (Pers.) R.H. Petersen (status 4). *Lobaria pulmonaria*, and *Tuckneraria laureri* are included in the “Red Data Book of the Russian Federation” [4] with statuses 2 and 3. Nine species (*Chaenotheca gracillima* (Vain.) Tibell, *Cladonia parasitica* (Hoffm.) Hoffm., *Evernia divaricata* (L.) Ach., *Hypogymnia bitteri* (Lyngé) Ahti, *H. vittata* (Ach.) Parrique, *Physconia detersa* (Nyl.) Poelt, *Ramalina farinacea* (L.) Ach., *R. thrausta* (Ach.) Nyl., *Rostania occultata*

(Bagl.) Ot lora et al.) require care demanding and are included in the Appendix 1 to the “Red Data Book of the Komi Republic” [3].

Some of the rare species (*Cetrelia olivetorum*, *Coenogonium luteum*, *Cliostomum leprosum*, *Dendrioscicta wrightii*, *Heterodermia speciosa*, *Multiclavula mucida*, and *Tuckneraria laureri*) may be found only in the southern part of the republic, being at the northern border of ranges. *Coenogonium luteum*, *Dendrioscicta wrightii* and *Multiclavula mucida* are extremely rare species with a single occurrence. Many of the species, especially epiphytes of deciduous trees, *Cetrelia olivetorum*, *Coenogonium luteum*, *Dendrioscicta wrightii*, and *Heterodermia speciosa* are suggested to be nemoral relics of the Holocene climatic optimum [24]. Rare populations of *Cetrelia olivetorum*, *Coenogonium luteum*, and *Dendrioscicta wrightii* are under protection in the Pechoro-Ilychskiy State Nature Reserve and the “Uninskiy” reserve (Northern Urals foothills). On the Vychegda Plain, these species are more common. The creation of the Koigorodskiy National Park made it possible to protect some of the southernmost habitats of these species in the republic.

During the monitoring protected lichen populations in the southern part of the Komi Republic in 2016–2018, we found the loss of previously known habitats as a result of forest fellings. The greatest damage was made to populations of a very rare species *Dendrioscicta wrightii*. This species has a intermittent eurasian-north american range and is known from India, China, Japan, USA (Alaska), Canada (British Columbia) and Russia (Central Russia, Urals, Western and Southern Siberia, Far East). Despite the wide geographical distribution of the species, its populations are rapidly declining throughout the entire range due to deforestation, air pollution, construction and recreation. A few habitats of *Dendrioscicta wrightii* in the Europe are historical. In Germany, the taxon is considered extinct, herbarium specimens date back to the end of the 19th century [22]. Other European findings are in Russia. In Vologda region and Karelia the species is considered extinct [23, 24]. The last living European populations are found in the Kostroma region [25], Perm region [26] and Komi Republic [3]. In the Komi Republic, seven habitats of the species have been found in the southern regions (Priluzsky, Koigorodsky) and two occurrences are in the foothills of the Northern Urals. In the Koigorodskiy district, the only known population of the species is located on the territory of

the Koigorodskiy National Park (near the tourist site “Matvey Shor”). Lichen thalli emerged on trunks of large old trees of *Sorbus aucuparia* L. in the spruce fern forest.

In the old fern spruce forest, we found 10 of 12 protected lichen species of the national park. Several species grow only in this habitat: *Cliostomum leprosum*, *Coenogonium luteum*, *Sclerophora coniophaea*, *Usnea longissima*. Rare relic species *Cetrelia olivetorum* and *Dendrioscicta wrightii* form relatively large populations. It should be emphasized that indigenous spruce and fir-spruce forests with large trees of *Salix caprea* L. and *Sorbus aucuparia* in the lower canopy of the stand serve as a key biotope for nemoral relics, as *Cetrelia olivetorum*, *Dendrioscicta wrightii*, *Heterodermia speciosa* and some other species. Such stands are of small areas and occur along the streams at slopes and in the relief depressions. In the primary spruce forests on the trunks of *Salix caprea* and *Sorbus aucuparia*, the epiphytic community *Lobarion pulmonariae* Ochner is formed. It is known to be rich in rare species of lichens that can grow only in climax forests [27]. At single trees of *Sorbus aucuparia*, we registered 3–7 species of lichens considered as rare and requiring monitoring in the Komi Republic. More and more information is accumulating about the reduction of ranges and sometimes the complete disappearance of some lichens characteristic of the communities of *Lobarion pulmonariae* Ochner in a number of regions of Europe [28]. Thus, the preservation of the last arrays of the pristine forests is extremely important, and the organization of the Koigorodskiy National Park contributes to the solution of this problem.

Eight protected lichen species were found in the old aspen forests. *Pertusaria hemisphaerica* and *Multiclavula mucida* were registered only in aspen stands. *Pertusaria hemisphaerica* grows on the bark of large aspen trees, *Multiclavula mucida* – on decaying woods. Despite the fact that a significant number of rare species have been recorded in the aspen forests, their occurrence is not high, and their abundance is low. The only exception is *Lobarion pulmonariae*, which massively populates the trunks of aspen. This species is also found on the territory of the Tulashor cluster, Nurgush State Nature Reserve.

Conclusion

The results of a survey of the territory of the Koigorodskiy National Park, carried out by specialists from the IB Komi SC UrB RAS,

confirmed the assumption about the importance of the reserve for the conservation of biological diversity in the ecotone zone between the middle and southern taiga and, in particular, key habitats of rare plant and fungi (including lichens) species. General state of ecosystems in the Koigorodskiy National Park is closed to the natural.

The national park has 32 species of protected plants and fungi listed in the “Red Data Book of the Komi Republic” [5]. Among them, there are seven species of vascular plants, four bryophytes, nine fungi and 12 lichens. Three representatives of the fungi kingdom (*Sarcosoma globosum*, *Lobaria pulmonaria*, and *Tuckneraria laureri*) are protected at the federal level. In a number of European countries, *Dendrocosticta wrightii* disappeared and populations of *Usnea longissima* and *Lobaria pulmonaria* are degrading as a result of increased anthropogenic pressure on ecosystems. Thus, regional protection of these species is facilitated by the establishment of the Koigorodskiy National Park.

The high diversity of lichens and fungi is explained by the fact that an array of intact coniferous and deciduous forests is located within the boundaries of the national park. Among the protected vascular plants and lichens, there are many species that can be considered as relics of the climatic optimum of the Holocene. The adjoining territories of two federal NPAs (Koigorodskiy National Park and “Tulashor” cluster, Nurgush State Nature Reserve) provide the inter-regional protection of *Leucocortinarius bulbiger*, *Lobaria pulmonaria*, *Microstoma protractum*, *Neckera pennata*, *Rigidoporus crocatus*, and *Thaollictrum nileberg*, included in the Red Data Books of the Komi Republic and the Kirov Region. It is necessary to continue targeted botanical research on the territory. This will allow to obtain more data on the species and coenotic diversity of the flora of the reserve and to reveal new habitats of rare species of plants and fungi, as well as to formulate recommendations aimed at their more effective protection.

The research was carried out in accordance of the state assignment of the IB Komi SC UrB RAS № 122040600026-9.

References

1. Krever V.G., Stishov M.S., Onufrenya I.A. Nature Protected Areas of Russia: the current state and problems of development. Moskva: Orbis pictus, 2009. 455 p. (in Russian).
2. Degteva S.V., Ermakov A.A. Scheme of development and placement of Nature Protected Areas of the Komi Republic // *Izvestiya Komi SC of UB RAS*. 2021. No. 5 (51). Ser. Experimental Biology and Ecology. P. 5–12 (in Russian).
3. The Red Data Book of the Komi Republic: third edition, official / Ed. S.V. Degteva. Syktyvkar: Komi Republican Printing House, 2019. 768 p. (in Russian).
4. The Red Data Book of the Russian Federation (plants and fungi) / Eds. L.V. Bardunov, V.S. Novikov. Moskva: KMK Scientific Publishing Association, 2008. 885 p. (in Russian).
5. The Red Data Book of the Russian Federation (animals) / Eds. D.S. Pavlov, A.M. Amirkhamov. Moskva: VNI Ekologiya, 2021. 1127 p. (in Russian).
6. Yaroshenko A.Yu., Potapov P.V., Turubanova S.A. Intact forest territories of the European North of Russia. Moskva: Greenpeace of Russia, 2001. 75 p. (in Russian).
7. Rose F. Temperate forest management: its effect on bryophyte and lichen floras and habitats // *Bryophytes and lichens in changing environment*. Oxford: Clarendon Press, 1992. P. 213–233.
8. Timonen J., Siitonen J., Gustafsson L., Kotiaho J.S., Stokland J.N., Sverdrup-Thygeson A., Mönkkönen M. Woodland key habitats in northern Europe: concepts, inventory and protection // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2010. V. 25. P. 309–324.
9. Atlas of Komi ASSR / Ed. Z.V. Panev. Moskva: Main Directorate of Geodesy and Cartography of the State Geological Committee of the USSR, 1964. 112 p. (in Russian).
10. Isachenko T.I., Lavrenko E.M. Botanical and geographical zoning // *Vegetation of the European part of the USSR*. Leningrad: Nauka, 1980. P. 10–20 (in Russian).
11. Herbarium: A reference guide / Ed. D.V. Geltman. Kew: Royal Botanic Gardens, 1995. 341 p. (in Russian).
12. Tolmachev A.I. Methods of comparative floristics and problems of florogenesis. Novosibirsk: Nauka, 1986. 196 p. (in Russian).
13. Yurtsev B.A., Kamelin R.V. The program of floristic studies of varying degrees of detail // *Theoretical and methodological problems of comparative floristics*. Leningrad: Nauka, 1987. P. 219–241 (in Russian).
14. Hodgetts N.G., Söderström L., Blockeel T.L., Caspari S., Ignatov M.S., Konstantinova N.A., Lockhart N., Papp B., Schröck C., Sim-Sim M., Bell D., Bell N.E., Blom H.H., Bruggeman-Nannenga M.A., Brugués M., Enroth J., Flatberg K.I., Garilleti R., Hedenäs L., Holyoak D.T., Hugonnot V., Kariyawasam I., Köckinger H., Kučera J., Lara F., Porley R.D. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus // *Journal of Bryology*. 2020. V. 42. No. 1. P. 1–116. doi: 10.1080/03736687.2019.1694329
15. Degteva S., Bobretsov A., Bobrov Y., Dolgin M., Dulin M., Filippov N., Goncharova N., Hermansson J., Kanev V., Kirillov D., Kirillova I., Kirsanova O., Kochanov S., Kolesnikova A., Konakova T., Korolev A., Kosolapov D.

- Kulakova O., Kulyugina E., Loskutova O., Melekhina E., Mineev O., Mineev Y., Morozov V., Nakul G., Palamachuk M., Patova E., Pestov S., Petrov A., Poletaeva I., Ponomarev V., Pystina T., Rebriev Y., Romanov R., Selivanova N., Shiryayev A., Shubina T., Sterlyagova I., Tatarinov A., Teteryuk B., Teteryuk L., Ulle Z., Valuyskikh O., Zakharov A., Zheleznova G., Zinovyeva A., Dubrovskiy Y., Gruzdev B., Ichetkina A., Martynenko V., Oplesnina N., Panova V., Romanova I., Rubtsov M., Rybin L., Semenova N. Occurrences of threatened species included in the third edition of the Red Data Book of the Komi Republic (Russia) // Biodiversity Data Journal. 2021. V. 9. Article No. e73763. doi: 10.3897/bdj.9.e73763
16. The Red Data Book of the Kirov region: animals, plants, mushrooms / Eds. O.G. Baranova, E.P. Lachokha, V.M. Ryabov, V.N. Sotnikova, E.M. Tarasova, L.G. Tselishcheva. Kirov: Kirov Regional Printing House, 2014. 336 p. (in Russian).
17. Tarasova E.M. Preliminary check list of the vascular plants flora of the Tulashor cluster of the Nurgush Reserve // Proceedings of the Nurgush State Nature Reserve. V. 1. Kirov: Printing House "Staraya Vyatka", 2011. P. 154–169 (in Russian).
18. Lachoha E.P. Additions to the check list of the flora of vascular plants of the Tulashor cluster of the Nurgush Reserve // Proceedings of the Nurgush State Nature Reserve. V. 2. Kirov: Printing House "Staraya Vyatka", 2013. P. 95–98 (in Russian).
19. European Committee for the Conservation of Bryophytes (ECCB). Red Data Book of European bryophytes. European Committee for the Conservation of Bryophytes (ECCB), Trondheim, 1995. 291 p.
20. Kotkova V.M. The first information about the aphylophore fungi of the Tulashor cluster of the Nurgush Reserve // Proceedings of the Nurgush State Nature Reserve. V. 2. Kirov: Printing House "Staraya Vyatka", 2013. P. 78–86 (in Russian).
21. Fadeeva M.A. Nemoral species in the flora of Karelian lichens // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Ser. Biogeography. 2005. V. 7. P. 255–265 (in Russian).
22. Türk R., Wunder H. Die Flechten des Nationalparks Berchtesgaden und angrenzender Gebiete. Forschungsbericht, 42. Berchtesgaden: Nationalparkverwaltung Berchtesgaden, 2000. 131 p. (in German).
23. The Red Data Book of the Vologda region. V. 2 / Eds. G.Yu. Konechnaya, T.A. Suslova. Plants and fungi. Vologda: Rus, 2004. 359 p. (in Russian).
24. Red Data Book of the Republic of Karelia / Ed. O.L. Kuznetsov. Belgorod: Constant, 2020. 448 p. (in Russian).
25. Kuznetsova E.S., Skazina M.A. To the study of lichens of the Kostroma region // Novosti sistematiki nizhshikh rasteniy. V. 44. Sankt-Peterburg: Nauka, 2010. P. 200–209 (in Russian).
26. Karasev K.A., Selivanov A.E. Protected lichen *Sticta wrightii* Tuck. on the territory of the Perm Region // Scientific review. Biological sciences. 2015. No. 1. P. 75–76 (in Russian).
27. James P.W., Hawksworth D.L., Rose F. Lichen communities in the British Isles: a preliminary conspectus // Lichen ecology. London, New York, San Francisco: Academic Press, 1977. P. 295–413.
28. Farmer A.M., Bates J.W., Bell J.N.B. Comparisons of three woodland sites in NW Britain differing in richness of epiphytic *Lobaria pulmonariae* community and levels of wet acidic deposition // Holarctic Ecology. 1991. No. 14. P. 85–91.

**NDVI – alpha diversity relationship
in tropical montane cloud forest of Ecuador**

© 2022. S. Llerena^{1,2} ORCID: 0000-0002-0491-530X*

G. Toasa³ ORCID: 0000-0002-3739-2613*

A. I. Kurbatova¹ ORCID: 0000-0002-7763-5034*

¹Peoples' Friendship University of Russia,
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, Russia, 117198,

² Amazon Regional University Ikiam,
8 km road to Muyuna, Tena, Ecuador, 150150,

³Independent Biologist-Botanist,
Av. General Rumiñahui, Quito, Ecuador, 170501,
e-mail: alellerenag@gmail.com

In tropical forest the biodiversity is in a constant threat, some species are listed in the IUCN as vulnerable, endangered or threatened with extinction. Thus, a fast method for biodiversity determination or monitoring can contribute to its conservation. Remote sensing has demonstrated to be a powerful tool, and together with the vegetation indexes, can determine the vegetation state of forest. Recently researches have correlated the normalized differentiated vegetation index (NDVI) with species richness, structure and biodiversity of forests obtaining successful results.

This study, conducted in a Tropical Montane Cloud Forest (TMCF) of Ecuador, aims to correlate NDVI with alpha diversity estimators to understand its relationships. NDVI of Landsat OLI 8 Level 1 images in five months was determined. We considered a scene as valid in case of cloud coverage in the areas of interest below 25%. Radiometric and atmospheric corrections, with flaash tool, and the delimitation of the study site (ROI) were developed in ENVI 5.3 program. NDVI was calculated with ENVI 5.3 program (histograms allowed the determination of mean, maximum and minimum NDVI), and with ArcGIS 10.3 (for classification index). In field, species richness, Chao1, Shannon index, Simpson index, and biomass of three plots were quantified for trees with DBH ≥ 10 cm. Then, we calculate Pearson coefficient to correlate and disentangle the effects of altitude, diversity, richness, biomass and NDVI. A positive relationship was observed between Mean NDVI and Chao1 ($p < 0.10$) and Mean NDVI – richness ($p < 0.05$). In conclusion, NDVI can be considered useful to estimate richness and biodiversity and even to detect ecotone as was the case in this research. The application of this methodology could allow biodiversity assessment and monitoring in real time and low cost, which contributes in forest conservation programs.

Keywords: Landsat, normalized differentiated vegetation index, vegetation richness, diversity, tropical montane cloud forest.

УДК 504.064.37;502.2.05

**Соотношение NDVI и альфа-разнообразия
в тропических влажных горных лесах Эквадора**

© 2022. С. Йерена^{1,2}, инженер, аспирант,

Г. Тоаса³, биолог, ботаник, А. И. Курбатова¹, к. б. н., доцент,

¹Российский университет дружбы народов,
117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,

²Региональный университет Амазонки Икиам,
150150, Эквадор, г. Тена, 8 км дороги в Муюну,

³Независимый исследователь,
170501, Эквадор, г. Кито, просп. Генерала Руминьяуи,
e-mail: alellerenag@gmail.com

давать отклик на внешнее воздействие. Исследование биоразнообразия методами дистанционного зондирования Земли как основы устойчивого развития экосистемы тропического леса является актуальной задачей.

В недавних работах была выявлена положительная корреляция нормализованного дифференцированного индекса растительности (NDVI) с видовым разнообразием тропических лесов. Данное исследование тропического горного туманного леса Эквадора направлено на сопоставление NDVI с оценками альфа-разнообразия для определения характера их взаимосвязи. В работе по спутниковым снимкам Landsat OLI 8 уровня обработки Level 1 был определён NDVI за пять месяцев. В полевых условиях видовое разнообразие, индекс Чжао1, индекс Шеннона, индекс Симпсона и биомасса на трёх участках были количественно определены для деревьев с диаметром ствола ≥ 10 см. Далее для выявления взаимосвязи эффектов высоты, качественных и количественных показателей разнообразия с NDVI был рассчитан коэффициент Пирсона и определена взаимосвязь между средним значением NDVI и индексом Чжао1 ($p < 0,10$), а также между средним значением NDVI и видовым богатством ($p < 0,05$). Применение этой методологии может позволить проводить оценку и мониторинг биоразнообразия в режиме реального времени и с низкими затратами, что способствует реализации программ по сохранению лесов.

Ключевые слова: Landsat, нормализованный дифференцированный индекс растительности, разнообразие растительного покрова, биоразнообразие, тропический влажный горный лес.

The Andes Mountain range is along the center of Ecuador and includes Tropical Montane Cloud Forest (TMCF). It is considered a hotspot due to their biological richness and high level of endemism. Agriculture expansion plus extensive cattle ranching and forest clearing have fragmented and isolated this ecosystem. For this reason, the tropical Andes are a world conservation priority [1–3].

The knowledge of richness species and biodiversity in these forests is necessary to develop monitoring and conservation strategies. Owing to its current state of critical conservation, the tropical forest needs a rapid method for assessment and monitoring the biodiversity. For this type of forests, with high levels of biodiversity, the traditional field methodology is often costly and time consuming [4, 5]. Remote sensing has displayed great potential to perform this labor. This is a fast and nondestructive method which allows to estimate species richness, biodiversity and characterize the structure and composition of forests [6–8].

Thanks to satellites, it is possible to acquire, process and interpret images of a distant objects. Landsat 8 satellite was launched in 2013, its images are processed by geographic information systems (GIS), and have been used to assess the state of tropical forests and quantify properties of the earth's surface at a high spatial and spectral resolution with the application of vegetation indexes [5, 9, 10]. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is one of the most used vegetation index, it was introduced by Rouse et al. in 1974 and takes advantage of the fact that greener or healthier vegetation absorbs more visible light and reflects a large amount of near infrared light, while unhealthy or sparse vegetation (less green) reflects a large portion of visible light and less near infrared light [11]. Chlorophyll pigments, which are the largest

absorbers of radiation in the visible region, absorb in the red and blue regions of the visible spectrum (wavelength bands between 0.44 and 0.66 μm), but not in the green region where the reflectivity is much higher and its maximum value is observed in the near infrared range [12].

NDVI is found in many studies related with forest assessments or monitoring studies. It has been used to predict species richness [4, 13–17]. Also, it is associated with forest structure [5, 18–20]. With the contribution of the species-energy theory, NDVI has been connected with patterns of species diversity and tree species composition [4, 7, 21]. This theory states the energy as a limiting resource for species in an specific area [22]. Thus, the greater resource availability increase the primary productivity, specialization and diversity of species [5]. In addition, biodiversity and richness researches have shown a positive correlation between NDVI and diversity indexes like Shannon and Simpson [4, 23–27].

Although the number of investigations about biodiversity and its relationship with NDVI has increased, there are no studies that use this index and correlates it with species richness or biodiversity in tropical montane cloud forest (TMCF). Therefore, our aim is to demonstrate the potential of using remote sensing through NDVI to determine diversity and species richness in “El Cedral Ecolodge” a TMCF. The results will help to monitor the biodiversity in this type of forest and can be applied in other forests.

Materials and Methods

The study area is El Cedral Ecolodge with extension of 71 ha. It belongs to TCMF within Eastern Cordillera Real montane forests (NT0121). It is located in Yunguilla in the Northwestern of Pichincha province (Fig. 1),

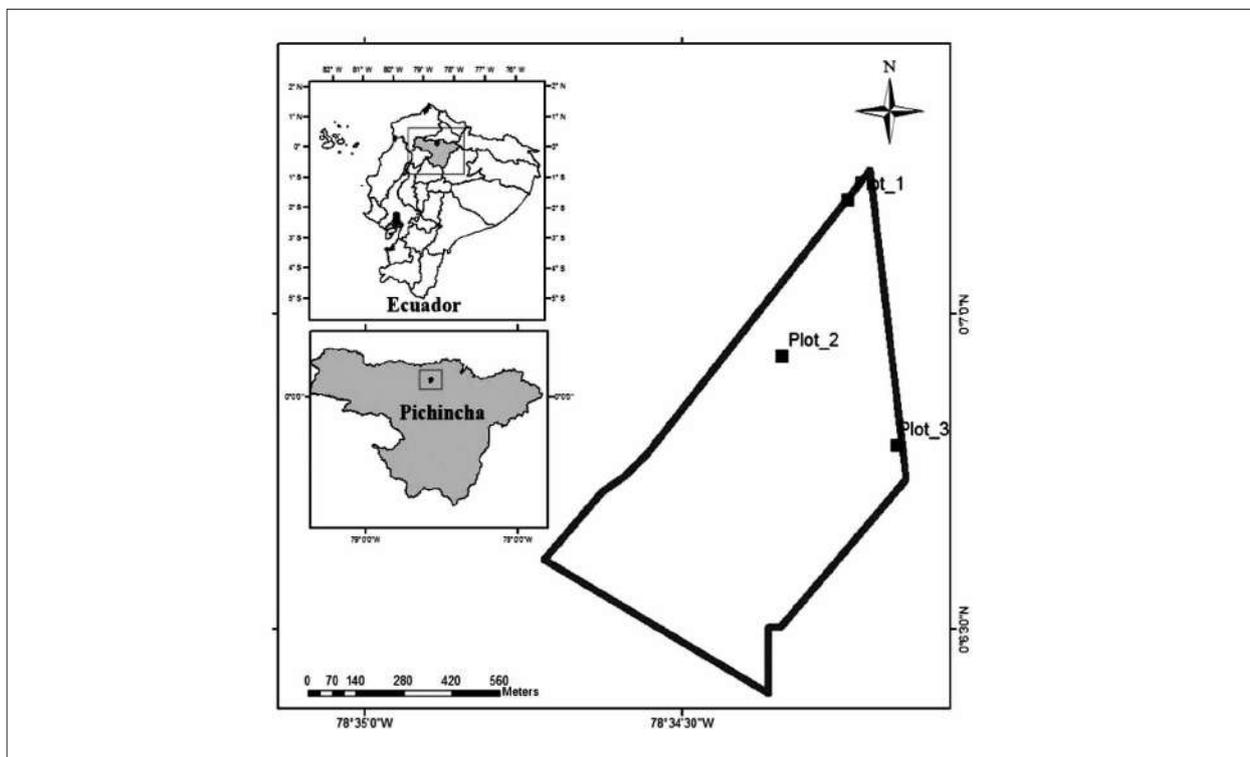


Fig. 1. Distribution map of the plots in the study area

in Ecuador country (latitude 0.114055° and longitude -78.570176°). The topography is rugged with sloping ravines and few flat areas. The annual precipitation ranges are between 1394 to 2414 mm. The vegetation cover is continuous with a canopy between 20 and 25 meters high. The site experiences two rainy seasons: March – April and October – November. According with the methodology of the National Forest Assessment of Ecuador [28], three plots of $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ were established (plot 1: 2521 meters above sea level (m.a.s.l.), plot 2: 2409 m.a.s.l., and plot 3: 2220 m.a.s.l.).

In each plot of $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, all individuals with a Diameter at Breast Height (DBH) $\geq 10\text{ cm}$ were sampled. The DBH $\geq 10\text{ cm}$ was measured at 1.3 meters [29]. The species identification was carried out based on botanical samples collected previously [30], virtual herbarium specimens, specialized literature of similar vegetation to the study area. Later, scientific names and distributions of the species were verified with the Catalog of Vascular Plants of Ecuador [31], and the database from Tropicos website [32]. Finally, a database with taxonomic information (S1) associated to each specimen was created and transformed to compatibles files with statistical packages PAST 2.17c [33], and JMP v 8.0 [34] where alpha species diversity estimators (richness S , Chao1, Shannon and Simpson indexes) were quantified.

For richness (S) calculation, the total number of species in each plot was registered [35]. Also, the richness estimator Chao1, based on the rare species number, was determined with the following formula [36]:

$$\text{Chao1} = S + \frac{a^2}{2b}$$

In the formula S is the species number in a sample, a is the number of singletons and b is the number of doubletons [37]. In addition, Shannon index (H) [38, 39] was calculated with the following formula:

$$H = -\sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln p_i,$$

where S is the species number, p_i the total sample proportion corresponding to the specie i in a plot, and \ln is natural logarithm. We considered low diversity $H = 0 - 0.35$, medium diversity $H = 0.36 - 0.7$, and high diversity $H = 0.71 - 1$.

Also, Simpson index ($D1$) was determined by the following formula:

$$D1 = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2.$$

The variables represent the same as in Shannon index. The interval of $D1$ is between 0 and 1, $D1 = 0$ means one species.

The above ground biomass (AGB) of each individual of each plot was estimated based on the

allometric equation for humid montane forests [40]. In this equation, D represents the diameter (cm) and $Dens$ is the wood density (g/cm^3). In order to get density values, a bibliographic review for each species was carried out and an average value was assigned [41]. The AGB formula is:

$$AGB = \exp[3.44153 + (-1.80919 \cdot \ln D) + (1.23665 \cdot (\ln D)^2) + (-0.12606 \cdot (\ln D)^3) + 1.7438 \cdot \ln(Dens)]$$

Five Landsat OLI 8 Level 1 images were downloaded from the United States Geological Surveys (USGS), for March, August, September, October and December. Thus, an annual variation in the vegetation index could be determined. A valid Landsat image had as a requirement the percentage of cloud coverage less than 25 in the area of interest. Landsat image processing was developed in ENVI 5.3 program. Here, the area of interest (ROI) was specified in the multispectral file (MTL). Radiometric calibration and atmospheric correction, with FLAASH Atmospheric Correction Model of the program, were performed. From these images, the NDVI was calculated with the formula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

where NIR is near infrared region (wavelength bands between 0.75–1.3 μm) and RED is red region (wavelength bands between 0.62–0.75 μm) of visible spectrum [12]. The relations between the coefficients in the formula generates values in the range of -1 and +1 (Table 1), where the intervals represent different types of land cover [42–44].

Finally, the quick statistics (mean, maximum, minimum and StdDev) from histograms were extracted for each NDVI image, and the corresponding NDVI values for pixels of the three plots were extracted from each image.

Then, Mean NDVI of all pixels falling in each plot (60 m \times 60 m) at different elevation gradient and in each month was determined. These results were correlated with elevation, diversity indexes (Shannon Wiener, Simpson), richness (S and Chao1), and biomass for each plot in STATISTICA program. Finally, for the most significant correlations, simple linear regressions were developed in RStudio software [45]. The strength of relationship was assessed by using coefficient of determination (r^2) and p value.

Results

A total of 657 individuals with a DBH ≥ 10 cm were registered in 3 plots (1.08 ha). In plot 1, the total individuals were 239 and 40 species were found. Plot 2 obtained a total of 247 individuals and 45 species. Finally, the total individuals in plot 3 was 171 with 43 species. Thus, the density of individuals in plot 3 was the lowest. When considering the altitudinal gradient, it was found that plot 2, located a 2409 m.a.s.l., possess the greatest species richness ($S = 45$, Chao1 = 51), followed by plot 3 (2220 m.a.s.l.) with 43 species (Chao1 = 49.6) and plot 1 (2521 m.a.s.l.) with 40 species (Chao1 = 44.5). These data could define plot 2 as an ecotone between this 300-meter gradient, if we consider that diversity (Shannon and Simpson indexes) decreases with altitude (Table 2).

Table 1

Intervals of NDVI scale

NDVI values	Type of land cover
< 0	No vegetation, water, clouds
0–0.09	Bare ground (degraded land, settlements, soil without vegetation cover)
0.1–0.29	Sparse Vegetation (scattered shrub, irrigated crops)
0.3–0.49	Medium Vegetation (forest plantations, bushes, slow-growing plantations)
> 0.5	Dense Vegetation (forest, dense growth plants)

Table 2

Richness and Diversity indexes for 3 plots in “El Cedral”

Richness and Diversity indexes	Plot 1	Plot 2	Plot 3
	(2521 m.a.s.l.)	(2409 m.a.s.l.)	(2220 m.a.s.l.)
Shannon Wiener	3.15	3.105	3.38
Simpson	0.93	0.91	0.95
Chao 1	44.5	51	49.6
Richness (S)	40	45	43

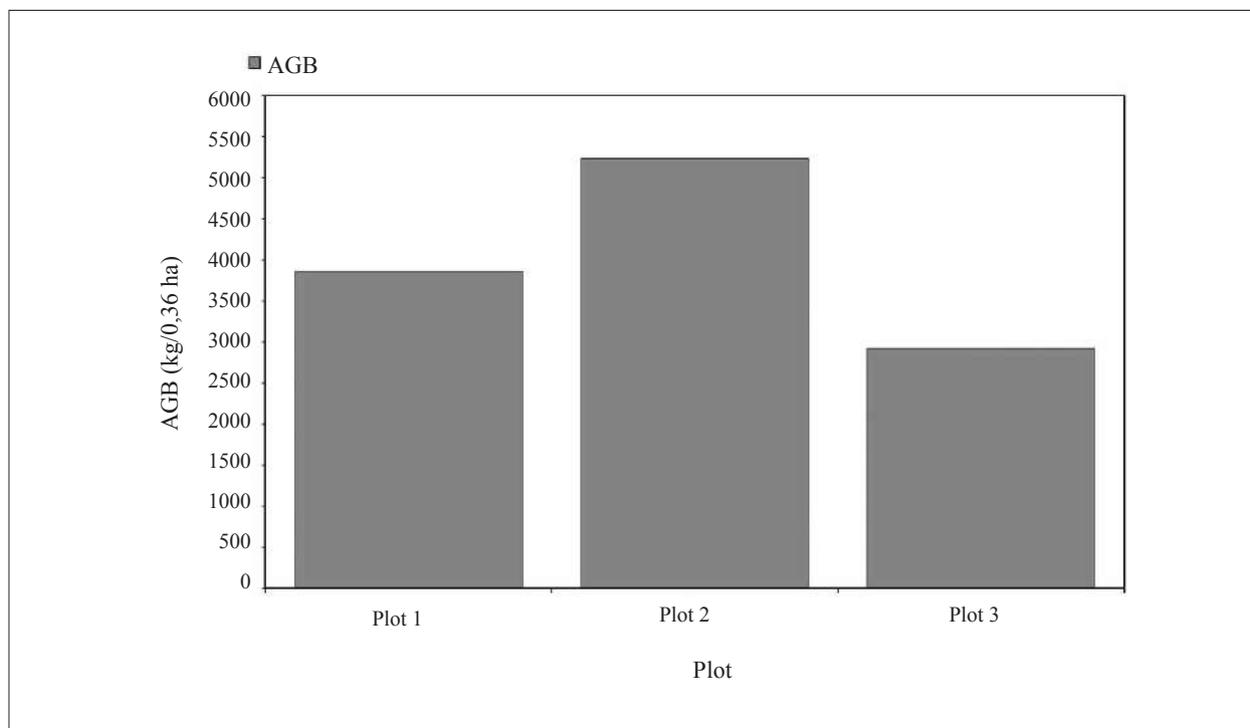


Fig. 2. Aboveground biomass (AGB) in kg/0.36 ha for three plots in "El Cedral"

The calculated biomass was 3858.41 kg/0.36 ha (Mean 16.14, Sd 7.77) in plot 1, 5230.48 kg/0.36 ha (Mean 21.17, Sd 10.74) in plot 2 and 2926.58 kg/0.36ha (Mean 17.11, Sd 8.48) in plot 3. Like in richness species, plot 2 showed the greatest value of biomass (Fig. 2).

Mean NDVI differences, for each plot, between rainy season (March, August, September, and October) and dry season (December) are clear (Fig. 3, see color insert IV). All NDVI for each plot in rainy season is more than 0.5 (Dense vegetation), while mean NDVI in December is located in the interval 0.3–0.49 (Medium vegetation). Accordingly, NDVI value decreases between rainy and dry season.

In the monthly NDVI data (Table 3) the same result of the NDVI graphs can be observed. In the rainy season, the months of March, August, September and October shows a mean NDVI of 0.82, 0.92, 0.86 and 0.79 respectively, that corresponds to dense vegetation. On the other hand, on December (dry season month) the media NDVI for the tree plots is 0.47 (medium vegetation).

In the relationships NDVI-richness and NDVI-biodiversity at different altitudes and seasons, it was found that in rainy season the NDVI correlates with Chao1 index with a positive Pearson coefficient (March: $r = 0.992$, August: $r = 0.983$, September: $r = 0.963$, October: $r = 0.7$) with a significance between 0.07 and 0.1.

With richness (S) the relationship with NDVI was also positive, however the level of significance was lower than the previous mentioned. This could be mainly due to the small number of plots sampled. A strong and significant correlation was found between mean NDVI and elevation in October (Fig. 4, $r = -0.99$, $p < 0.06$). In remain months, a negative correlation was also obtained, but the significance was lower, due to the number of plots.

Discussion

The alpha diversity indexes yielded high diversity results for TMCF. Similar results have been seen in Ecuador, such as those found in the study carried out in Andean Montane Evergreen Forest at an altitude of 2705 m.a.s.l. Here, diversity was high with a maximum index of Shannon species of 0.90 and Simpson of 0.87. In general, in this type of tropical forest at altitudes between 2000 and 3000 m.a.s.l., similar diversity values are observed, as is the case of Peruvian Andean Montane Cloud Forest where diversity indexes reached higher values. Simpson index was located between 0.8 and 0.19 and Shannon index between 2.7 and 3.6 [46]. Likewise, in Myanmar Tropical Forest the maximum Shannon Diversity Index was 3.20 and Simpson Diversity Index 0.96. This study pointed precipitation as crucial factor in the development of plant diversity [47].

Table 3

Minimum, maximum, and mean NDVI ± standard deviation of NDVI by months

Plot	Min NDVI	Max NDVI	Mean NDVI	StdDev
March				
Plot 1	0.80	0.83	0.81	0.01
Plot 2	0.82	0.84	0.83	0.01
Plot 3	0.82	0.83	0.83	0.00
NDVI Mean (month)	0.81	0.83	0.82	0.01
August				
Plot 1	0.86	0.93	0.89	0.02
Plot 2	0.90	0.96	0.93	0.02
Plot 3	0.90	0.95	0.93	0.02
NDVI Mean (month)	0.89	0.95	0.92	0.02
September				
Plot 1	0.69	0.85	0.79	0.05
Plot 2	0.88	0.91	0.89	0.01
Plot 3	0.87	0.93	0.90	0.02
NDVI Mean (month)	0.81	0.90	0.86	0.03
October				
Plot 1	0.45	0.85	0.70	0.13
Plot 2	0.70	0.84	0.79	0.25
Plot 3	0.82	0.93	0.89	0.03
NDVI Mean (month)	0.66	0.87	0.79	0.14
December				
Plot 1	0.51	0.58	0.54	0.03
Plot 2	0.44	0.47	0.46	0.01
Plot 3	0.41	0.43	0.42	0.01
NDVI Mean (month)	0.45	0.49	0.47	0.01

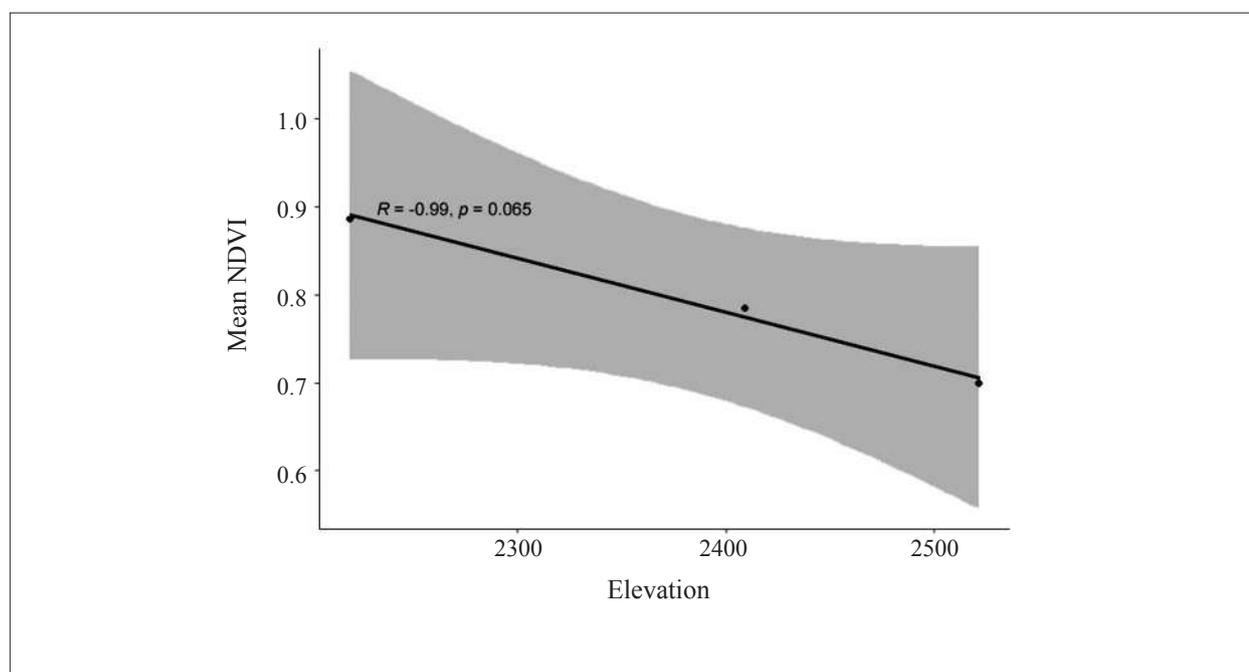


Fig. 4. Relationship between mean NDVI (October) and elevation (m.a.s.l.)

Similar values of AGB for cloud forest in Ecuador were found in the Río Guajalito Reserve, where other allometric equation was applied [48]. In such study, the estimated tree biomass for primary forest was 15160 kg/ha and we determined for the three plots the AGB amounts of 10717.8, 14529.11 and 8129.38 kg/ha.

A positive and strong relationship between NDVI and Chao1 was expected because it is known that between species richness and primary productivity there is a positive relationship [22], which in other forest studies has been estimated with NDVI as reflectance indicator [49]. In addition, these findings are consistent with the research results where the species richness was identified using remote sensing and NDVI [4, 13, 14, 16, 27, 50, 51]. This suggests that NDVI calculated from Landsat 8 images could be used to estimate species richness in TMCF when plot data are available.

Regarding the relationship between mean NDVI and elevation, its negative correlation means that when the elevation diminishes the NDVI increases. This can be explained with the fact that the number of individuals, also decreased with the altitude. Thus, in plot 3 the number of individuals was the lowest. According to [52], in the majority of altitudes the relationship between NDVI and elevation is positive. Nevertheless, in the range of altitude between 2200 to 2500 m.a.s.l. a negative relationship has been observed like in this research. A high NDVI showed in the lower elevation is because of a higher productivity owing to high temperature and sufficient water availability [53]. In addition, it is important to mention that plot 2 was catalogued as an ecotone because it can explain the NDVI decrease between plot 1 and plot 2.

Since species diversity is related to richness and abundance [54], a strong correlation between Shannon and Simpson indexes with NDVI was expected [20]. Nevertheless, the relationship was moderate and positive, like in other studies [5, 13, 55] where Shannon index and Simpson index were applied [4, 24, 26, 56]. Our correlations were not significant, hence, we recommended to sample more plots to discover the real relationship between these parameters. The plot size of 60 m × 60 m was established due to the fact that the pixel dimension of Landsat image is 30 m × 30 m and the small number of plots (3) was because of the difficulty in establishing extensive plots (60 × 60) homogeneous in terms of slope percentage. TMCF in the study area has a strong steep and very strong steep slope and the larger the plot, the less homoge-

neous it is [57]. Besides the TMCF usually are difficult to access [58]. Based on bibliography reviewed about positive and significant relationships between NDVI and diversity indices with a greater number of plots [4–6, 9, 15, 16, 19, 20, 24, 27, 52], the relationships in this study were also expected to be significant considering the difficulties mentioned.

Conclusion

Remote sensing, with the use of satellite images, has been playing an increasingly important role in forest conservation. Together with vegetation indexes have estimated richness, diversity and biomass over time. Within its advantages are high spatial-temporal resolution and easy global availability. On the other hand, its applicability is still limited by technical issues such as cloudiness in the images and the need for calibrations and corrections. Nevertheless, when overcome these limitations through appropriate techniques and the inclusion of environmental factors, diversity predictions can be more accurate.

By using field data and satellite imagery, our study has important implications in understanding the relationships between NDVI and alpha species diversity. We found a strong positive and significant relationship between species richness and NDVI. This relationship was analyzed in the two seasons of tropical forest and it was observed that in the rainy season the NDVI is higher, which is attributed to precipitation that offer better water availability and temperature to increase the photosynthetic rate and therefore productivity. The differences in seasonal NDVI are crucial to understand as it can be predicted how forests will respond to future climate changes. Finally, NDVI can be considered a useful method to estimate richness and biodiversity (using a greater number of plots) and even to detect ecotone as was the case in this research.

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program. We also thank, El Cedral Ecologde and the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE for the logistic support in Ecuador.

References

1. Jarvis A., Touval J.L., Schmitz M.C., Sotomayor L., Hyman G.G. Assessment of threats to ecosystems in South America // *Journal for Nature Conservation*. 2010. V. 18. No. 3. P. 180–188. doi: 10.1016/j.jnc.2009.08.003

2. Climate change and biodiversity in the tropical Andes / Eds. S. Herzog, R. Martínez, P. Jørgensen, H. Tieszen. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 2011. doi: 10.13140/2.1.3718.4969
3. Llerena S., Arias P., Cueva J., Almeida G., Salazar C. Identifying priority management of Ecuadorian forests based on the environmental integrated assessment // E3S Web of Conferences. 2020. V. 169. Article No. 02015. doi: 10.1051/e3sconf/202016902015
4. Bawa K., Rose J., Ganeshiah K.N., Barve N., Kiran M.C., Umashaanker R. Assessing biodiversity from space: An example from the Western Ghats, India // Ecology and Society. 2002. V. 6. No. 2. P. 7–11. doi: 10.5751/es-00434-060207
5. Feeley K.J., Gillespie T.W., Terborgh J.W. The utility of spectral indices from Landsat ETM+ for measuring the structure and composition of tropical dry forests // Biotropica. 2005. V. 37. No. 4. P. 508–519. doi: 10.1111/j.1744-7429.2005.00069.x
6. Foody G.M., Boyd D.S., Cutler M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. No. 4. P. 463–474. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00039-7
7. Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladeland M., Sterling E., Steininger M. Remote sensing for biodiversity science and conservation // Trends in Ecology and Evolution. 2003. V. 18. No. 6. P. 306–314. doi: 10.1016/S0169-5347(03)00070-3
8. Peng Y., Fan M., Song J., Cui T., Li R. Assessment of plant species diversity based on hyperspectral indices at a fine scale // Scientific Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 1–11. doi: 10.1038/s41598-018-23136-5
9. Madonsela S., Cho M.A., Ramoelo A., Mutanga O. Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 133. No. January 2018. P. 116–127. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.10.008
10. Pesaresi S., Mancini A., Casavecchia S. Recognition and characterization of forest plant communities through remote-sensing NDVI time series // Diversity. 2020. V. 12. No. 8. Article No. 313. doi: 10.3390/D12080313
11. Rouse J., Hass R., Schell J., Deering D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp. 1974. V. 1. P. 309–317. doi: 10.1021/jf60203a024
12. Pettorelli N. The normalized difference vegetation index. United Kingdom: Oxford University Press, 2013. 43 p.
13. Pau S., Gillespie T.W., Wolkovich E.M. Dissecting NDVI-species richness relationships in Hawaiian dry forests // Journal of Biogeography. 2012. V. 39. No. 9. P. 1678–1686. doi: 10.1111/j.1365-2699.2012.02731.x
14. Fairbanks D., McGwire K. Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: Regional scale analysis with multi-temporal NDVI // Global Ecology and Biogeography. 2018. V. 13. No. 3. P. 221–235.
15. Wang R., Gamon J. Remote sensing of terrestrial plant biodiversity // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 231. P. 1–15. doi: 10.1016/j.rse.2019.111218
16. Pouteau R., Gillespie T.W., Birnbaum P. Predicting tropical tree species richness from normalized difference vegetation index time series: The devil is perhaps not in the detail // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 5. P. 11–13. doi: 10.3390/rs10050698
17. Wang R., Gamon J.A., Montgomery R.A., Townsend P.A., Zyguelbaum A.I., Bitan K., Tilman D., Cavender-Bares J. Seasonal variation in the NDVI-species richness relationship in a prairie grassland experiment (cedar creek) // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 2. doi: 10.3390/rs8020128
18. Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L., Griffin K.L., Hartley E., Joel G., Peñuelas J., Valentini R. NDVI canopy structure photosynthesis // Ecological Applications. 1995. V. 5. No. 1. P. 28–41.
19. Freitas S.R., Mello M.C.S., Cruz C.B.M. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest // Forest Ecology and Management. 2005. V. 218. P. 353–362. doi: 10.1016/j.foreco.2005.08.036
20. Cabacinha C.D., de Castro S.S. Relationships between floristic diversity and vegetation indices, forest structure and landscape metrics of fragments in Brazilian Cerrado // Forest Ecology and Management. 2009. V. 257. No. 10. P. 2157–2165. doi: 10.1016/j.foreco.2009.02.030
21. Skidmore A.K., Oindo B.O., Said M.Y. Biodiversity assessment by remote sensing // Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of the Environment: Information for Risk Management and Sustainable Development, 2003. P. 1–4.
22. Currie D. The university of Chicago energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness // The American Naturalist. 1991. V. 137. No. 1. P. 27–49.
23. Hashemi S.A., Fallah Chai M.M., Bayat S. An analysis of vegetation indices in relation to tree species diversity using by satellite data in the northern forests of Iran // Arabian Journal of Geosciences. 2013. V. 6. No. 9. P. 3363–3369. doi: 10.1007/s12517-012-0576-8
24. Madonsela S., Cho M.A., Ramoelo A., Mutanga O., Naidoo L. Estimating tree species diversity in the savannah using NDVI and woody canopy cover // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 66. No. January. P. 106–115. doi: 10.1016/j.jag.2017.11.005
25. Kiran G.S., Mudaliar A. Remote sensing & geoinformatics technology in evaluation of forest tree diversity // Pelagia Research Library. 2012. V. 2. No. 3. P. 237–242.
26. Arekhi M., Yılmaz O.Y., Yılmaz H., Akyüz Y.F. Can tree species diversity be assessed with Landsat data in a temperate forest? // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. V. 189. No. 11. P. 1–14. doi: 10.1007/s10661-017-6295-6

27. Mohammadi J., Shataee S. Possibility investigation of tree diversity mapping using Landsat ETM+ data in the Hyrcanian forests of Iran // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. No. 7. P. 1504–1512. doi: 10.1016/j.rse.2010.02.004
28. Aguirre N., Añazco M., Ordoñez L., Pekkarinen A., Ramirez C., Román R.M., Sánchez G., Velasco C. Metodología para el desarrollo del estudio piloto de la ENF en conformidad con el mecanismo REDD+. Quito: MAE y FAO, 2010. 59 p.
29. Phillips O.L., Baker T.R., Brienen R., Feldpausch T.R. Field manual for plot establishment and remeasurement. South America: RAINFOR, 2010. 24 p.
30. MECN. Áreas Naturales del Distrito Metropolitano de Quito: Diagnóstico Bioecológico y Socioambiental. V. 53. 1-st ed. Quito: Imprenta Nuevo Arte, 2010. 52 p.
31. Jorgensen P., Ulloa C., Maldonado C. Riqueza de plantas vasculares // *Botánica Económica de Los Andes Centrales*. 2006. P. 37–50.
32. Tropicos. Missouri Botanical Garden [Internet resource] <https://tropicos.org/home> (Accessed: 04.05.2021)
33. Hammer O., Harper D., Ryan P. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4. No. 1. P. 9.
34. Statistical software for insight-driven improvement [Internet resource] https://www.jmp.com/en_us/home.html (Accessed: 15.01.2022)
35. Colwell R. Biodiversity: concepts, patterns, and measurement. *The Princeton guide to ecology* / Eds. S.A. Levin, S.R. Carpenter, H.Ch.J. Godfray, A.P. Kinzig, M. Loreau, J.B. Losos, B. Walker, D.S. Wilcove. Princeton: Princeton University Press, 2009. P. 257–263. doi: 10.1515/9781400833023.257
36. Chao A. Nonparametric estimation of the number of classes in a population // *Scandinavian Journal of Statistics*. 1984. V. 11. No. 4. P. 265–270. doi: 10.2307/4615964
37. Colwell R.K., Coddington J.A. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*. 1994. V. 345. No. 1311. P. 101–118. doi: 10.1098/rstb.1994.0091
38. Shannon C. A Mathematical theory of communication // *Bell System Technical Journal*. 1948. V. 27. No. 4. P. 623–656. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x
39. Shannon C., Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana: The University of Illinois Press, 1964. 131 p.
40. Alvarez E., Duque A., Saldarriaga J., Cabrera K., de las Salas G., del Valle I., Lema A., Moreno F., Orrego S., Rodríguez L. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia // *Forest Ecology and Management*. 2012. V. 267. P. 97–308. doi: 10.1016/j.foreco.2011.12.013
41. Rodríguez M., Sibille A. *Manual de identificación de especies forestales de la subregión andina*. INIA-OIMT, 1996. 489 p.
42. Llerena S., Tarko A., Kurbatova A., Kozhevnikova P. Assessment of carbon dynamics in Ecuadorian forests through the mathematical spatial model of global carbon cycle and the normalized differential vegetation index (NDVI) // *E3S Web Conf*. 2019. V. 96. Article No. 02002. doi: 10.1051/e3sconf/20199602002
43. Cartaya Ríos S., Zurita Alfaro S., Rodríguez Ríos E., Montalvo Párraga V. Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí // *UDy La Geomática*. 2014. V. 9. P. 5–17.
44. Kafria V., Albanakis K., Oikonomidis D. Flood susceptibility assessment using G . I . S . An example from Kassandra Peninsula, Greece. *Proc. 10th Int. Congr. Hell. Geogr. Soc.*, 2014. P. 22–24.
45. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio Team. PBC [Internet resource] <https://www.rstudio.com> (Accessed: 05.15.2021).
46. Ledo A., Condés S., Alberdi I. Forest biodiversity assessment in Peruvian Andean Montane cloud forest // *Journal of Mountain Science*. 2012. V. 9. No. 3. P. 372–384. doi: 10.1007/s11629-009-2172-2
47. Khaine I., Woo S.Y., Kang H., Kwak M.J., Je S.M., You H., Lee T., Jang J., Lee H.K., Lee E., Yang L., Kim H., Lee J.K., Kim J. Species diversity, stand structure, and species distribution across a precipitation gradient in tropical forests in Myanmar // *Forests*. 2017. V. 8. No. 8. P. 1–15. doi: 10.3390/f8080282
48. Mapstone E. Carbon sequestration in the cloud forest: A comparative evaluation of aboveground biomass carbon stock potential in the Río Guajalito Reserve // *Independent Study Project*. 2017. P. 1–29.
49. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote sensing of primary production // *International Journal of Remote Sensing*. 1986. V. 7. No. 11. P. 1395–1416. doi: 10.1080/01431168608948944
50. Nagendra H., Rocchini D., Ghate R., Sharma B., Pareeth S. Assessing plant diversity in a dry tropical forest: Comparing the utility of landsat and ikonos satellite images // *Remote Sensing*. 2010. V. 2. No. 2. P. 478–496. doi: 10.3390/rs2020478
51. Gillespie T. Predicting woody-plant species richness in Tropical Dry Forest: A case study from south Florida, USA // *Ecological Applications*. 2005. V. 15. No. 1. P. 27–37.
52. Zhan Z., Liu H., Li H., Wu W., Zhong B. The relationship between NDVI and terrain factors – A case study of chongqing // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. V. 12. P. 765–771. doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.347
53. Liu L., Wang Y., Wang Z., Li D., Zhang Y., Qin D. Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau // *Ecological Indicators*. 2019. V. 107. No. 5. P. 1–11. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105569
54. Sanjit L., Bhatt D. Commentary how relevant are the concepts of species diversity and species richness? //

Journal of Bioscience. 2005. V. 30. No. 5. P. 557–560. doi: 10.1007/BF02703552

55. Foody G.M., Cutler M.E.J. Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks // Ecological Modelling. 2006. V. 195. No. 1–2. P. 37–42. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.11.007

56. Meng J., Li S., Wang W., Liu Q., Xie S., Ma W. Estimation of forest structural diversity using the spectral and textural information derived from SPOT-5 satellite im-

ages // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 125. doi: 10.3390/rs8020125

57. Van den Meerssche S. Carbon storage on an elevational gradient on the west side of the Andes (Ecuador). Ghent University: Faculty of Bioscience Engineering, 2020. 74 p.

58. Llerena S., Kurbatova A., Grigorets E. Carbon sequestration in tropical montane cloud forests // Environment and Human: Ecological Studies. 2021. V. 11. No. 3. P. 377–397. doi: 10.31862/2500-2961-2021-11-3-377-3977

**Особенности биоаккумуляции тяжёлых металлов в тканях
большой ложноконской пиявки *Haemopsis sanguisuga* L.
в водных экосистемах Урала**

© 2022. Л. В. Черная¹, к. б. н., с. н. с.,
Л. А. Ковальчук¹, д. б. н., г. н. с.,
Н. В. Микшевич², к. х. н., доцент,

¹Институт экологии растений и животных Уральского отделения
Российской академии наук,
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202,
²Уральский государственный педагогический университет,
620017, Россия, г. Екатеринбург, пр. Космонавтов, д. 26,
e-mail: kovalchuk@ipae.uran.ru, mikshevich@gmail.com

Исследованы особенности биоаккумуляции Cu, Zn, Cd, Pb в тканях большой ложноконской пиявки *Haemopsis sanguisuga* (L., 1758) в водных экосистемах природных и антропогенно нарушенных территорий Урала. На основании сравнительного анализа экспериментальных данных определены диапазоны фоновых концентраций Cu, Zn, Cd, Pb для донных отложений водных объектов Урала. Показано, что в условиях антропогенной трансформации ландшафтов и персистентного поступления поллютантов в водные объекты Урала, у населяющих их ложноконских пиявок уровень содержания ТМ напрямую связан с их концентрациями в донных отложениях, что указывает на принципиальную возможность использования пиявок в качестве организмов-индикаторов при проведении мониторинга за загрязнением водных экосистем Урала такими поллютантами, как Cu, Zn, Cd, Pb.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, пиявка, донные отложения, биоаккумуляция, организмы-индикаторы.

**Features of bioaccumulation of heavy metals
in the tissues of the great false horse leech *Haemopsis sanguisuga* L.
in aquatic ecosystems of the Urals**

© 2022. L. V. Chernaya¹ ORCID: 0000-0002-3386-9824,
L. A. Kovalchuk¹ ORCID: 0000-0003-0467-1461,
N. V. Mikshevich² ORCID: 0000-0003-2388-4278

¹Institute of Plant and Animal Ecology Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
202, 8 Marta St., Yekaterinburg, Russia, 620144,
²Ural State Pedagogical University,
26, Kosmonavtov Pr., Yekaterinburg, Russia, 620017,
e-mail: kovalchuk@ipae.uran.ru, mikshevich@gmail.com

Investigation into intense impact of industrial pollution on the aquatic ecosystems of the Ural region is one of tasks of environmental monitoring. To estimate peculiarities of the bioaccumulation of Cu, Zn, Cd, Pb in tissues of the leech *Haemopsis sanguisuga* (L., 1758) from aquatic ecosystems of natural and anthropogenically disturbed territories of the Ural have been first studied. The studies were based on the verification of 100 samples of bottom sediments and 100 adults of *H. sanguisuga* from 10 water bodies of the Sverdlovsk and Chelyabinsk regions. The gross contents of Cu, Zn, Cd, Pb in the skin-muscle tissue of leeches and in the bottom sediments were estimated by atomic absorption method on an AAS-3 spectrophotometer and on an Analyst-100 instrument from Perkin Elmer. 800 element determinations were carried out. Estimated ranges of background concentrations of Cu, Zn, Cd, Pb for bottom sediments of water bodies of Ural region are determined. It was found that the content of Cu, Cd, Pb in the bottom sediments of water bodies located in anthropogenic disturbed areas is higher than in natural water bodies ($p < 0.001$), with the exception of Zn ($p = 0.929$). It is shown that in the tissues of *H. sanguisuga* individuals living under anthropogenic

stress, the content of HM is significantly higher than that of leeches from natural water bodies ($p < 0.001$). And the level of HM in tissues of leeches is directly related to their concentrations in bottom sediments: Cu ($r = 0.69$; $p < 0.001$), Zn ($r = 0.67$; $p < 0.001$), Cd ($r = 0.75$; $p < 0.001$), Pb ($r = 0.52$; $p < 0.001$). This indicates the fundamental possibility of using leeches as indicator organisms when monitoring the pollution of the aquatic ecosystems of the Ural by such pollutants as Cu, Zn, Cd, Pb.

Keywords: heavy metals, leeches, bottom sediments, bioaccumulation, indicator organisms.

Промышленные предприятия Урала оказывают масштабное и интенсивное воздействие на водные экосистемы, что требует особого внимания при организации мониторинговых мероприятий, включая и экотоксикологические исследования.

Из химических веществ, загрязняющих водную среду, реальную угрозу для жизнедеятельности гидробионтов представляют тяжёлые металлы (ТМ) и их соединения. Опасность заключается не только в их биологической активности, но и в способности к аккумуляции в многочисленных компонентах экосистем. Экотоксикологический подход к исследованию сопряжённой системы «донные отложения – макрозообентос» довольно объективно отражает состояние как гидробионтов, так и среды их обитания. Известно, что макрозообентос, как один из ключевых элементов водных экосистем, является надёжным и объективным биогеохимическим индикатором загрязнения придонных вод и донных отложений (ДО). В качестве биоиндикаторов загрязнения водной среды ТМ могут использоваться различные группы донных беспозвоночных: моллюски, личинки насекомых, губки, медицинские пиявки [1–8]. К числу перспективных объектов мониторинга загрязнения водной среды ТМ относится большая ложноконская пиявка *Haemopsis sanguisuga* L. 1758, отвечающая основным требованиям к индикаторным организмам: широкий ареал, достаточно крупные размеры (до 10 см), продолжительность жизни более пяти лет, высокая резистентность к экотоксикантам, простота отлова (ручной сбор) [9, 10].

Цель данного исследования – изучение особенностей биоаккумуляции ТМ у пресноводной пиявки *Haemopsis sanguisuga* L. в водных экосистемах природных и антропогенно нарушенных территорий Урала.

Объекты и методы исследования

В исследованиях использованы взрослые особи большой ложноконской пиявки *H. sanguisuga*, отловленные в водных объектах природных экосистем (ПЭ) и антропогенно

нарушенных территорий (АНТ) Урала: р. Сулем (57°44,2' с. ш., 59°52,6' в. д.) и водохранилища Сулемское (57°46,1' с. ш., 59°50,3' в. д.), Висимский биосферный заповедник; р. Тагил (57°37,8' с. ш., 59°96,3' в. д.), г. Верхний Тагил; р. Бардым (56°57,4' с. ш., 59°35,6' в. д.), ненаселённая горнолесная местность Нижнесергинского района Свердловской области; вдхр. Нижнесергинское (56°67,6' с. ш., 59°32,6' в. д.), г. Нижние Серьги; оз. Шарташ (56°84,9' с. ш., 60°71,4' в. д.) и р. Исеть (56°84,9' с. ш., 60°58,2' в. д.), г. Екатеринбург; оз. Б. Миассово (55°8,6' с. ш., 60°16,3' в. д.) и оз. Б. Таткуль (55°11,5' с. ш., 60°17,0' в. д.), Ильменский государственный заповедник; оз. Ильменское (55°0,3' с. ш., 60°8,5' в. д.), г. Миасс.

Пиявок собирали вручную, в первую декаду августа, в дневное время, в литоральной части водоёмов. Одновременно проводили отбор ДО из верхнего 10-см слоя дна с помощью цилиндрического пробоотборника. Отлов и содержание пиявок, доставленных в лабораторию, осуществляли в соответствии с правилами, принятыми Европейской конвенцией по защите животных, используемых для экспериментальных и научных целей.

Пробы ДО и кожно-мышечной ткани пиявок готовили способом «мокрой» минерализации высушенных образцов в смеси азотной и хлорной кислот [11]. Валовое содержание Cu, Zn, Cd, Pb в пробах определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре ААС-3 в пламени пропан-бутан и на приборе Analyst 100 фирмы Perkin Elmer. Концентрацию металлов выражали в мкг/г воздушно-сухой массы. Характер и уровень биологической аккумуляции ТМ пиявками оценивали с помощью значений коэффициента биологического накопления ($K_{\text{БН}}$), рассчитанных по отношению тканевых концентраций ТМ к их концентрациям в ДО. Использовано 100 особей пиявок, подготовлено 200 проб и проведено 800 элементоопределений.

Экспериментальные данные обрабатывали с использованием пакета лицензионных прикладных программ «Statistica 7.0» (StatSoft, Ink., 1984–2001).

Результаты и обсуждение

Оригинальные результаты спектрофотометрического анализа проб ДО из водных объектов Урала представлены в таблице 1. Поскольку в настоящее время в РФ не установлены предельно допустимые концентрации ТМ для ДО, при оценке уровня загрязнения изучаемых водных объектов были использованы традиционные контрольные показатели – кларк земной коры и диапазоны фоновых концентраций первых из литературных источников [11, 12].

Установлено, что средние концентрации Cu, Zn и Pb в ДО водоёмов природных экосистем соответствуют контрольным показателям, исключение по уровню содержания Cu составили ДО из р. Тагил (табл. 1). Вместе

с тем для концентраций Cd во всех случаях отмечено их кратное превышение над кларком, что указывает на антропогенную природу этого поллютанта и согласуется с литературными данными о высоком уровне накопления Cd в абиотических и биотических компонентах экосистем не только на импактных, но и на фоновых территориях [13–19]. Так, по нашим данным, диапазон концентраций Cd в ДО фоновых водных объектов Европейской территории России (места обитания биоиндикатора загрязнения – медицинских пиявок) составил 0,92–1,72 мкг/г [20], что существенно выше не только значения кларка, но и данных, основанных на исследованиях, проведённых в 90-е годы прошлого столетия [11].

Есть мнение, что особо охраняемые природные территории в силу удалённости от пря-

Таблица 1 / Table 1

Валовое содержание тяжёлых металлов (мкг/г сухой массы) в донных отложениях водных экосистем Урала / The total content of heavy metals (µg/g dry matter) in the sediments aquatic ecosystems in the Urals

Водные объекты Water bodies	Содержание ТМ, мкг/г / The content of HM, µg/g			
	Cu	Zn	Cd	Pb
Природные экосистемы / Natural ecosystems				
Озеро Б. Миассово / Lake B. Miassovo	17,48±0,70 ^a	45,52±1,38 ^a	1,36 ±0,01 ^a	8,28 ±0,05 ^a
Озеро Б. Таткуль / Lake B. Tatkul	20,49±0,72 ^{ab}	69,69±1,59 ^{bc}	1,65±0,05 ^b	8,14±0,02 ^a
Водохранилище Сулемское Reservoir Sulemskoe	18,65±0,89 ^a	51,61±0,94 ^{de}	1,42±0,03 ^a	8,46±0,13 ^a
Река Сулем / Sulem River	9,29±0,78	48,91±1,41 ^{ae}	1,38±0,05 ^a	8,11±0,09 ^a
Река Бардым / Bardym River	13,57±0,43	64,80±1,31 ^b	1,29±0,01 ^a	7,96±0,22 ^a
Среднее по водоёмам Average for reservoirs	15,90±0,64	56,11±1,45	1,42±0,02	8,19±0,06
ANOVA F _{4;45} (p)	53,5 ($< 0,001$)	66,2 ($< 0,001$)	19,9 ($< 0,001$)	2,43 (0,614)
Антропогенно нарушенные территории / Anthropogenically disturbed areas				
Озеро Ильменское / Lake Ilmenskoe	26,71±0,9 ^c	83,74±1,16	1,76±0,01 ^{bc}	9,25±0,25
Озеро Шарташ / Lake Shartash	23,03±1,24 ^{bc}	38,73±1,2 ^f	2,04±0,03 ^d	15,50±0,23 ^b
Река Исеть / Iset River	24,74±1,40 ^c	40,74±1,13 ^f	2,22±0,02	17,47±0,22 ^b
Водохранилище Нижнесергинское Reservoir Nizhneserginskoe	33,65±1,20	50,87±1,19 ^{de}	1,89±0,03 ^{ce}	12,36±0,25
Река Тагил / Tagil River	58,61±1,64	75,42±2,29 ^c	1,98±0,04 ^{de}	16,18±0,39 ^b
Среднее по водоёмам Average for reservoirs	33,35±1,96 [*]	57,90±2,71	1,98±0,02 [*]	14,20±0,44 [*]
ANOVA F _{4;45} (p)	83,9 ($< 0,001$)	181,2 ($< 0,001$)	51,3 ($< 0,001$)	189,0 ($< 0,001$)
Контрольные показатели / Benchmarks				
Кларк земной коры Clarks in the lithosphere [12]	47	83	0,13	16
Фоновые водные объекты Background water bodies [11]	4,0–50,0	8,0–60,0	0,1–1,2	5,0–18,0

Примечание: * – статистически значимые различия при $p < 0,05$; одинаковые надстрочные буквы означают отсутствие статистически значимых различий при $p > 0,05$.

Note: * – statistically significant differences at $p < 0,05$; the same superscript letters indicate no statistically significant differences at $p > 0,05$.

мых источников антропогенного загрязнения могут быть использованы в качестве фоновых [21]. Следовательно, выявленные диапазоны концентраций ТМ в ДО исследуемых природных водных объектов Урала можно принять за фоновые для водных экосистем изучаемого региона.

Поскольку концентрации ТМ в ДО изучаемых водных объектов лежат в широком диапазоне концентраций (табл. 1), использование дисперсионного анализа (ANOVA) позволило выявить значимые биотопические различия содержания Zn, Cu, Cd ($p < 0,001$) в ДО природных водоёмов, тогда как для Pb отмечен сопоставимо низкий уровень содержания ($p = 0,614$) (табл. 1). Напротив, в ДО водных объектов АНТ для Pb, равно как и для других элементов, отмечена очень высокая вариабельность концентраций: Pb, Zn, Cu, Cd ($p < 0,001$).

Показано, что ДО водных объектов, расположенных на АНТ, содержат изучаемые ТМ в больших количествах, чем ДО природных водоёмов ($p < 0,001$) за исключением Zn ($p = 0,929$). Наиболее значимые различия характерны для реки Сулем и географически близкой ей р. Тагил, в ДО которых содержание Cu, Cd, Pb отличается в 6,3, 1,4 и 2,1 раз, соответственно ($p < 0,001$) (табл. 1). Следует отметить, что изучаемый участок р. Тагил, в отличие от остальных исследуемых водных объектов, подвержен сочетанному влиянию таких антропогенных факторов как тепловое загрязнение (непосредственный сброс воды из Верхнетагильского водохранилища) и от атмосферного поступления выбросов Кировградского медеплавильного комбината, расположенного на расстоянии ≈ 13 км. Необходимо также отметить, что повышенный уровень содержания Cd и Pb в ДО р. Исеть и оз. Шарташ, несомненно, связан с высокой транспортной нагрузкой г. Екатеринбурга.

Дисперсионный анализ (ANOVA) показал статистически значимые биотопические различия для содержания всех ТМ в тканях пиявок ($p < 0,001$) (табл. 2). Наиболее высокая вариабельность характерна для тканевых концентраций Zn у пиявок из ПЭ и Cu, Zn, Cd – из водных объектов АНТ. Показано, что в тканях особей *H. sanguisuga*, обитающих в условиях антропогенной нагрузки, уровень содержания всех изучаемых ТМ значительно выше, чем у пиявок из природных водоёмов ($p < 0,001$). Наиболее значимые различия, как и в случае с ДО, выявлены для тканей пиявок из рек Сулем и Тагил, где содержания Cu, Zn, Cd, Pb отличаются в 9,4, 3,7, 3,4 и 1,7 раз,

соответственно ($p < 0,001$). Следует отметить также высокие концентрации Cd и Pb в тканях пиявок из р. Исеть (г. Екатеринбург) (табл. 2).

При изучении биоаккумуляционной активности пиявок было установлено, что практически во всех природных водоёмах особи *H. sanguisuga* являются микроконцентраторами Cu ($0 < K_{\text{БН}} < 2$), исключение составили пиявки из р. Сулем ($K_{\text{БН}} > 2$) (табл. 3). Пиявки из городских водоёмов отличаются более высокой кумулятивной активностью по отношению к Cu, и в большинстве водоёмов они являются её макроконцентраторами.

Показано, что во всех изучаемых водных объектах, независимо от уровня антропогенной нагрузки, *H. sanguisuga* являются макроконцентраторами Zn (табл. 3), но в большей степени повышенная кумулятивная активность к Zn отмечена у пиявок, обитающих в водоёмах АНТ. Наряду с другими факторами это может быть обусловлено и высокими концентрациями Cu в их тканях, а, следовательно, реализации синергического эффекта [14].

По отношению к токсичному Cd пиявки из природных водоёмов являются микро- или макроконцентраторами (табл. 3). Обитающие в водных объектах АНТ особи *H. sanguisuga* накапливают Cd намного эффективней и во всех случаях являются его макроконцентраторами. Следует отметить пониженную кумулятивную активность к Cd у пиявок из озера Ильменское, что вероятно обусловлено высоким содержанием в их тканях Zn – физиологического антагониста Cd. Вместе с тем, у пиявок из р. Тагил на фоне максимальных концентраций Zn в тканях, накопление Cd происходит интенсивнее, что может быть связано с тепловым режимом водоёма.

Следует отметить, что особи *H. sanguisuga* из природных водоёмов являются микро- или макроконцентраторами Pb, а пиявки, обитающие в водоёмах с высокой антропогенной нагрузкой, отличаются пониженной кумулятивной активностью к этому поллютанту и во всех водных объектах, за исключением оз. Ильменское, являются его микроконцентраторами (табл. 3).

Таким образом, ложноконские пиявки, обитающие в условиях антропогенного загрязнения, отличаются повышенной биоаккумуляционной способностью к Cu, Zn и Cd, а высокие значения коэффициента биологического накопления свидетельствуют о биологической доступности и возможности ТМ включаться в физиологические и биохимические процессы организма.

Таблица 2 / Table 2

Валовое содержание тяжёлых металлов (мкг/г сухой массы) в тканях пиявки *H. sanguisuga*
 The total content of heavy metals (µg/g dry matter) in the tissues of leeches *H. sanguisuga*

Водные объекты Water bodies	Содержание ТМ, мкг/г / The content of HM, µg/g			
	Cu	Zn	Cd	Pb
Природные экосистемы / Natural ecosystems				
Озеро Б. Миассово Lake B. Miassovo	25,55±1,46 ^a	435,27±4,13 ^a	1,98±0,17 ^a	17,00±1,00 ^a
Озеро Б. Таткуль / Lake B. Tatkul	27,57±1,74 ^a	979,80±9,13 ^b	2,94±0,07	15,66±0,77 ^{ab}
Водоохранилище Сулемское Reservoir Sulemskoe	26,63±0,68 ^a	553,00±7,90 ^c	3,35±0,12 ^b	20,20±0,43 ^c
Река Сулем / Sulem River	19,44±0,72	455,11±6,07 ^a	2,14±0,03 ^a	15,71±0,86 ^{ab}
Река Бардым / Bardym River	26,59±1,41 ^a	526,62±13,28 ^c	3,15±0,11 ^b	15,62±0,47 ^{ab}
Среднее по водоёмам Average for reservoirs	25,16±0,68	589,96±28,73	2,71±0,09	16,84±0,38
ANOVA F _{4;45} (p)	8,05 (< 0,001)	442,3 (< 0,001)	28,3 (< 0,001)	7,21 (< 0,001)
Антропогенно нарушенные территории / Anthropogenically disturbed areas				
Озеро Ильменское Lake Ilmenskoe	69,93±1,27 ^b	1253,62±13,98	3,67±0,14 ^b	23,70±1,14 ^{cd}
Озеро Шарташ / Lake Shartash	79,37±1,17 ^{bc}	1097,64±12,31 ^d	4,90±0,07 ^c	28,98±0,90 ^e
Река Исеть / Iset River	84,82±1,24 ^c	1114,65±22,85 ^d	8,46±0,25 ^d	31,52±0,94 ^e
Водоохранилище Нижнесергинское Reservoir Nizhneserginskoe	52,92±1,20	989,50±10,43 ^b	4,52±0,16 ^c	22,69±0,88 ^{cd}
Река Тагил / Tagil River	182,35±3,38	1690,57±27,12	7,30±0,18 ^d	27,44±2,66 ^{de}
Среднее по водоёмам Average for reservoirs	93,88±6,59*	1229,20±36,20*	5,78±0,27*	26,89±0,69*
ANOVA F _{4;45} (p)	752,7 (< 0,001)	240,5 (< 0,001)	155,6 (< 0,001)	9,46 (< 0,001)

Примечание: * – статистически значимые различия при p < 0,05; одинаковые надстрочные буквы означают отсутствие статистически значимых различий при p > 0,05.

Note: * – statistically significant differences at p < 0.05; the same superscript letters indicate no statistically significant differences at p > 0.05.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты биологического накопления тяжёлых металлов в тканях пиявки *H. sanguisuga*
 The coefficients of biological accumulation of heavy metals in the tissues of leeches *H. sanguisuga*

Водные объекты Water bodies	Коэффициенты биологического накопления The coefficients of biological accumulation			
	Cu	Zn	Cd	Pb
Природные экосистемы / Natural ecosystems				
Озеро Б. Миассово / Lake B. Miassovo	1,46	9,56	1,46	2,05
Озеро Б. Таткуль / Lake B. Tatkul	1,35	14,06	1,78	1,92
Водоохранилище Сулемское / Reservoir Sulemskoe	1,43	10,71	2,36	2,39
Река Сулем / Sulem River	2,09	9,31	1,55	1,94
Река Бардым / Bardym River	1,96	8,13	2,44	1,96
Среднее по водоёмам / Average for reservoirs	1,66	10,35	1,92	2,05
Антропогенно нарушенные территории / Anthropogenically disturbed areas				
Озеро Ильменское / Lake Ilmenskoe	2,62	14,97	2,09	2,56
Озеро Шарташ / Lake Shartash	3,45	28,34	2,40	1,87
Река Исеть / Iset River	3,43	27,36	3,81	1,80
Водоохранилище Нижнесергинское Reservoir Nizhneserginskoe	3,11	22,42	3,69	1,70
Река Тагил / Tagil River	1,57	19,5	2,39	1,84
Среднее по водоёмам / Average for reservoirs	2,84	22,52	2,88	1,95

Корреляционный анализ показал отсутствие статистически значимой связи между содержанием Cd ($r = 0,13$; $p = 0,368$) и Pb ($r = 0,19$; $p = 0,186$) в тканях *H. sanguisuga*, обитающих в природных водоёмах, и концентрациями этих экотоксикантов в ДО, что вполне ожидаемо в условиях их низкой вариабельности и фонового содержания в среде обитания. Вместе с тем у этой группы пиявок выявлена статистически значимая положительная связь для Cu ($r = 0,48$; $p < 0,001$) и Zn ($r = 0,75$; $p < 0,001$), что вероятно обусловлено атмосферным поступлением этих ТМ в ДО отдельных водоёмов ПЭ.

Для особей *H. sanguisuga*, обитающих в водных объектах АНТ, уровень содержания в тканях всех изучаемых ТМ симбатно связан с их концентрациями в донных отложениях: Cu ($r = 0,69$; $p < 0,001$), Zn ($r = 0,67$; $p < 0,001$), Cd ($r = 0,75$; $p < 0,001$), Pb ($r = 0,52$; $p < 0,001$), что подтверждает биоиндикационный потенциал исследуемого вида пиявок.

Заключение

Необходимость совершенствования принципов и методов мониторинга водных экосистем, в частности, решения вопроса о нормировании загрязняющих веществ в донных отложениях, требует дополнительных критериев степени загрязнения гидросферы, в том числе поиска надёжных организмов-индикаторов среди представителей макрозообентоса. В данном контексте результаты наших исследований могут найти практическое применение.

Определены фоновые концентрации Cu, Zn, Cd, Pb в донных отложениях водоёмов из заповедных и антропогенно нарушенных территорий Уральского региона. Показано, что в условиях антропогенной трансформации ландшафтов и персистентного поступления поллютантов в водные объекты Урала, у населяющих их ложноконских пиявок уровень содержания ТМ напрямую связан с их концентрациями в донных отложениях, служащих для токсикантов в качестве депо. Согласно полученным данным, аккумуляция ТМ в тканях *H. sanguisuga* адекватно отражает экологическое состояние изучаемых водных объектов, что указывает на принципиальную возможность использования этой пиявки в качестве организма-индикатора при проведении мониторинга загрязнения водных экосистем Урала такими поллютантами, как Cu, Zn, Cd, Pb.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН 122021000091-2 и частично поддержана грантом Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» 12-П-4-1049.

References

1. Smith S., Chen M.-H., Bailey R.G., Williams W.P. Concentration and distribution of copper and cadmium in water, sediments, detritus, plants and animals in a hardwater lowland river // *Hydrobiologia*. 1996. V. 341. P. 71–80. doi: 10.1007/BF00012305
2. Chapman P.M. Utility and relevance of aquatic oligochaetes in ecological risk assessment *Aquatic Oligochaete Biology VIII. Developments in Hydrobiology* / Eds. P. Rodriguez, P.F.M. Verdonshot. V. 158. Springer, Dordrecht, 2001. doi: 10.1007/978-94-010-0597-5_17
3. Romanenko V.D., Lyashenko A.V., Afanasyev S.A., Zorina-Sakharova E.E. Bioindication of ecological the state of reservoirs within the city of Kyiv // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 2010. V. 46. No. 2. P. 3–7 (in Russian).
4. Lukashev D.V. Accumulation of heavy metals by mollusks *Lymnaea stagnalis* as an indicator of contamination of small water bodies // *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 2015. V. 51. No. 2. P. 74–81 (in Russian).
5. Padovan A., Munksgaard N., Alvarez B., McGuinness K., Parry D., Gibb K. Trace metal concentrations in the tropical sponge *Spherospongia vagabunda* at a sewage outfall: synchrotron X-ray imaging reveals the micron-scale distribution of accumulated metals // *Hydrobiologia*. 2012. V. 687. P. 275–288. doi: 10.1007/s10750-011-0916-9
6. Bogatov V.V., Prozorova E.N., Chernova E.V., Lyashenko L.A. Features of bioaccumulation of heavy metals in bivalve molluscs (*Bivalvia*) in natural water bodies of East Asia // *Vestnik dalnevostochnogo otdeleniya RAN*. 2018. No. 4 (200). P. 79–87 (in Russian).
7. Alaama M., Abdulkader A.M., Ghawi A.M., Merzouk A., Khalid R.S., Helaluddin A.B.M. Assessment of trace heavy metals contamination in the tissues and saliva of the medicinal leech *Hirudinaria manillensis* // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2021. V. 5. P. 225–231. doi: 10.4194/1303-2712-v21_5_02
8. Bian B., Zhou Y., Fang B. Distribution of heavy metals and benthic macroinvertebrates: Impacts from typical inflow river sediments in the Taihu Basin, China // *Ecological Indicators*. 2016. V. 69. P. 348–359. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.04.048
9. Lukin E.I. Leeches of fresh and brackish waters. Leningrad: Nauka, 1976. V. 1. 484 p. (in Russian).
10. Flerov B.A. Ecological and physiological aspects of toxicology of freshwater animals. Leningrad: Nauka, 1989. 144 p. (in Russian).
11. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V., Pokarzhevskiy A.D. Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1993. 291 p. (in Russian).

12. Vinogradov A.P. The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust // *Geokhimiya*. 1962. No. 7. P. 555–571 (in Russian).
13. Stepanova N.Yu., Yakovlev V.A., Latypova V.Z. Zoobenthos as an indicator of ecotoxicological situation in the Kuibyshev reservoir // *Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*. 2007. No. 2. P. 50–57 (in Russian).
14. Moiseyenko T.I. Water ecotoxicology: theoretical and applied aspects. Moskva: Nauka, 2009. 400 p. (in Russian).
15. Mikshevich N.V., Kovalchuk L.A. Aquatic environment and human ecological safety. Ekaterinburg: Publishing house of the Ural State Pedagogical University, 2014. Ch. 1. 128 p. (in Russian).
16. Reshetnyak O.S., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S. Long-term variability of the content of compounds cadmium and lead in river ecosystems of Russia // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2017. No. 1. P. 71–80 (in Russian). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(71-80)
17. Riabova E.G. Content of heavy metals in urban surface water bodies // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 36–40. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-036-040
18. Goswami A.P., Das S., Kalamdhad A.S. Assessment of possible pollution risk using spatial distribution and temporal variation of heavy metals in river sediments // *Environmental Earth Sciences*. 2021. V. 80. P. 677–692. doi: 10.1007/s12665-021-09983-y
19. Schwantes D., Gonçales Junior A.G., Manfrin J., Campagnolo M.B., Zimmermann J., Conradi Junior E., Bertoldo D.C. Distribution of heavy metals in sediments and their bioaccumulation on benthic macroinvertebrates in a tropical Brazilian watershed // *Ecological Engineering*. 2021. V. 163. Article No. 106194. doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106194
20. Chernaya L.V., Kovalchuk L.A., Mikshevich N.V. Geographical variability in the content of heavy metals in the tissues of medicinal leeches (*Hirudo medicinalis*, *Hirudo verbana*) and in bottom sediments from their habitat // *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. 2019. V. 4. No. 3. P. 67–77 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2019.051
21. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096

**Мониторинг парков прибрежной зоны Невской губы
с помощью моллюска *Arianta arbustorum***

© 2022. Н. Н. Камардин^{1,2}, д. б. н., в. н. с.,
С. В. Холодкевич^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. лабораторией,
В. М. Макеева³, д. б. н., в. н. с.,

¹Научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук,
197110, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18,

²Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9,

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1,
e-mail: nik-kamardin@yandex.ru, kholodkevich@mail.ru, vmmakeeva@yandex.ru

В качестве биоиндикатора накопленного антропогенного загрязнения в парках на побережье Невской губы был использован лёгочный моллюск-вселенец *Arianta arbustorum* (Linnæus, 1758). Измерение концентрации тяжёлых металлов (ТМ) в гепатопанкреасе улиток проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре и атомно-эмисионном спектрометре с использованием индуктивно-связанной плазменной эмиссии. Также было проведено физиологическое исследование терморезистентности улиток из различных прибрежных биотопов, что позволяет сравнивать степень загрязнения в парках на побережье Невской губы. Скорость снижения частоты сердечных сокращений (ЧСС) после выключения теплового воздействия сравнивалась у улиток из посёлка Новая Ропша (референтная локация) с остальными локациями (парки Александрия, Ораниенбаум, Дубки). По накоплению ТМ в гепатопанкреасе улиток выделяется парк Ораниенбаум. Обнаружено достоверное ($p \leq 0,05$) превышение внутритканевой концентрации исследованных ТМ (Cu, Mn, Zn, Ni, Cd, Pb) по сравнению с референтной локацией в п. Новая Ропша и с другими локациями. Потенциальный экологический риск, определённый по Хакансону, в парке Ораниенбаум оценивался как высокий. Терморезистентность улиток из этой загрязнённой ТМ локации характеризуется как низкая, что говорит о возможном нарушении защитной системы белков теплового шока у улиток. Это может уменьшать их способность восстанавливать денатурированные теплоем белки, в том числе и сократительные белки сердца, что обычно приводит к быстрому падению ЧСС у моллюсков из загрязнённых мест.

Ключевые слова: *Arianta arbustorum*, накопление тяжёлых металлов, потенциальный экологический риск, частота сердечных сокращений, терморезистентность.

**Monitoring of parks in the coastal zone
of the Neva bay with the snail *Arianta arbustorum***

© 2022. N. N. Kamardin^{1,2} ORCID: 0000-0002-8803-5691¹
S. V. Kholodkevich^{1,2} ORCID: 0000-0002-7561-9743²
V. M. Makeeva³ ORCID: 0000-0002-4360-5371³

¹St. Petersburg Research Center for Ecological Safety
of the Russian Academy of Sciences,

18, Korpusnaya St., St. Petersburg, Russia, 197110,
²St. Petersburg State University,

7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, 199034,
³Moscow State University of Lomonosov,

1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: nik-kamardin@yandex.ru, kholodkevich@mail.ru, vmmakeeva@yandex.ru

Analysis of environmental problems, assessment and prediction are closely related to the study of populations of widespread animal species, in our case, of mollusk *Arianta arbustorum* (Linnæus, 1758), mass invasion of which is known

for the Leningrad region and in St. Petersburg since the second half of the 2000 years. The concentration of heavy metals (HM) in snail's hepatopancreas was measured on an atomic absorption spectrophotometer and an atomic emission spectrometer using inductively coupled plasma emission. In order to monitor accumulated anthropogenic pollution in the parks on the coast of the Neva bay the thermoresistance of snails from various coastal biotopes was studied. The rate of decrease in heart rate (HR) after switching off the heat exposure (lasting for 20 minutes) was compared in snails from the village of New Ropsha (reference location) and other locations: Alexandria Park, Oranienbaum Park, Dubki Park. According to the accumulation of HM in the snail's hepatopancreas, in Oranienbaum Park significant ($p \leq 0.05$) excess for all studied HM (Cu, Mn, Zn, Ni, Cd, Pb) was found in comparison with the reference location in the village of New Ropsha and with other locations. The potential environmental risk determined according to Hakanson in Oranienbaum Park was rated as high. The thermoresistance of snails from this location contaminated with HM is characterized as low, which suggests a possible violation of the protective system of heat shock proteins. This may reduce their ability to restore heat-denatured proteins, including contractile proteins of the heart, which usually leads to a rapid drop in HR in mollusks from polluted sites.

Keywords: *Arianta arbustorum*, accumulation of heavy metals, potential environmental risk, heart rate, thermoresistance.

Среди животных и растений известны так называемые «биоиндикаторы накопления тяжёлых металлов», способные в десятки, а иногда и в сотни раз увеличивать концентрацию тяжёлых металлов (ТМ) в своём организме по сравнению со средой и служить надёжными маркерами природных и антропогенных загрязнений [1]. Анализ, оценка и прогноз экологических проблем тесно связаны с изучением популяций широко распространённых видов животных, например, моллюска *Arianta arbustorum* (Linnæus, 1758), массовое расселение которого известно для Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга со второй половины 2000-х гг. [2]. Интерес к этой улитке вызван двумя причинами. С одной стороны, эти моллюски являются удачной моделью успешной инвазии, а, с другой стороны, высокая плотность популяции и широкое распространение позволяют использовать их как биоиндикаторы качества окружающей среды (ОС), как было в случае с кустарниковой улиткой, близкого по экологии вида [3]. Известны работы, посвящённые скорости роста раковины, особенностям генома, изоморфизма ферментов, накопления ТМ в раковине, связанных с антропогенной нагрузкой [4, 5]. Наземные брюхоногие моллюски реагируют на аммиак и сероводород [6] и способны накапливать металлы непосредственно из почвы, независимо от приёма пищи [7]. Улитки являются надёжными биоиндикаторами качества почв, и используются в стандартизированных тестах на токсичность почвы, например, в ISO-15952:2006. Прямое попадание загрязнителей из почвы в моллюска происходит как при каждом контакте, так и во время заглатывания почвы вместе с пищей. Функциональное состояние улиток обычно оценивается по накоплению ТМ в тканях моллюска [8, 9]. Для определения потенциального экологического

риска (RI) часто используется метод, предложенный Хакансоном [10].

Целью работы является оценка состояния парков на северном и южном берегах Невской губы с применением биоиндикаторного животного – лёгочного моллюска *Arianta arbustorum*.

Объекты и методы исследования

Северный и южный берега от устья реки Невы до городов Ломоносов и Репин низкие, покрыты зарослями кустарников. Средняя температура воздуха в июне 20,0 °С, в июле – 24,0 °С, в августе – 23,4 °С. Влажность воздуха колеблется от 60 до 92%, на побережье составляет 90–95%. На рисунке 1 представлена карта-схема Невской губы с участками, на которых проводились мониторинговые исследования с использованием моллюска *A. arbustorum*. Почвы на исследуемой территории суглинистые.

Для древесной улитки известны только две морфы: тёмно-коричневая полосная и светло-жёлтая полосная. Первая является доминантной над рецессивной светлой [11]. Мы использовали взрослые особи коричневой морфы, собранные в обозначенных локациях в период лета – осени 2018 г.

Аналитические методы анализа. Подготовку образцов тканей пищеварительной железы улиток для определения концентрации ТМ проводили следующим образом. Выделенные органы криофиксировали при температуре -23 °С в течение 2–3 недель. Затем размороженные и осушенные фильтровальной бумагой образцы тканей взвешивали на аналитических весах «QNAUS Pioneer» PA214C с точностью до 0,1 мг. Взвешенные образцы помещали в мерные пробирки и добавляли 2 мл 70% HNO₃ «ос. ч» (ГОСТ 30178-96).

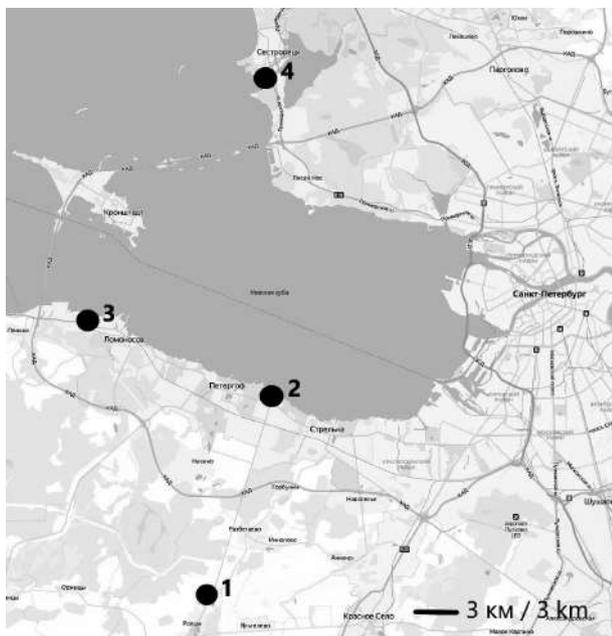


Рис. 1. Карта-схема участков наблюдений: 1 – пос. Новая Ропша; 2 – парк Александрия, г. Петергоф; 3 – парк Ораниенбаумский, г. Ломоносов; 4 – парк Дубки, г. Сестрорецк
Fig. 1. Map scheme of observation sites: 1 – village New Ropsha, 2 – park Alexandria, Peterhof; 3 – Oranienbaum park at the city of Lomonosov; 4 – park Dubki, Sestroretsk

Пробирки с образцами нагревали в сушильном шкафу при температуре 90 °С до полной минерализации образцов. После остывания пробы доводили до объёмов 2 или 5 мл деминерализованной водой, полученной с помощью прибора «Millipore Milli-Q» А-10 производства «Merck» (Германия).

Для определения содержания подвижных форм ТМ в почве сухие пробы грунта помещали в 0,1М HNO₃, нагревали в течение 2–3 ч, интенсивно перемешивая. После охлаждения и отстаивания в течение 2–3 сут при комнатной температуре, надосадочный раствор отделяли от осадка и фильтровали. Измерение концентрации ТМ в тканях улиток и пробах почвы осуществляли на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ААС) фирмы «SHINADZUA-7000» (Япония) с термоатомизатором и микродозатором проб, а также атомно-эмиссионном спектрометре «SHINADZU ICPE-9000» (Япония) с использованием индуктивно-связанной плазменной эмиссии (ИСП АЭС). Перед измерением строили калибровочную кривую мультикомпонентного стандарта производства «MERCK» в 0,1н HNO₃. Результаты выражали в миллиграммах на килограмм влажного веса (мг/кг в. в.).

Определение индекса потенциального экологического риска проводили с использованием метода Хакансона [10] по формуле:

$$E_{ir} = \frac{T_{ir} \cdot C_{if}}{C_{if}}, \quad C_{if} = \frac{C_i}{C_n},$$

где E_{ir} – индекс потенциального экологического риска для отдельного металла; C_{if} – фактор загрязнения, вычисленный как отношение концентрации металла в объекте (C_i) к референтной концентрации металла в почве (C_n); T_{ir} – токсический фактор отдельного металла, адаптированный Хакансоном [10] (5 – для Pb и Cu; 1 – для Zn; 30 – для Cd; 6 – для Ni). Индекс потенциального экологического риска (RI) всех факторов вычислялся как сумма отдельных индексов E_{ir} .

Метод регистрации кардиоактивности.

Кардиоактивность записывали в режиме online, используя оригинальный неинвазивный метод [12]. К раковине моллюска над областью сердца прикрепляли миниатюрный датчик, соединявшийся волоконно-оптическим кабелем с фотоплетизмографом, аналоговый сигнал с которого через аналого-цифровой преобразователь поступал на персональный компьютер, в котором с помощью программы «VarPulse» в реальном времени измеряли временные тренды частоты сердечных сокращений (ЧСС). Полученные значения архивировались в виде TXT файлов [12].

Метод стандартизованной функциональной нагрузки (теплового шока). Экспериментальная установка для тестирования моллюсков с использованием теплового воздействия (так называемого «теплового шока») в качестве функциональной нагрузки моллюсков состояла из цилиндрического прозрачного террариума диаметром 30 см и высотой 45 см. Опыты проводили после суточной акклиматации к условиям террариума и температуре в лаборатории 22 °С. Животных кормили свежей зеленью и огурцами *ad libitum*.

В верхней части террариума был вмонтирован модернизированный электрический фен, позволяющий быстро, в течение 5 мин, поднимать температуру воздуха в террариуме от комнатной до 50,0±1,0 °С и поддерживать её длительное время. Контроль над температурой осуществляли с помощью термопары, соединённой милливольтметром.

Статистическая обработка результатов.

Числовые значения ЧСС представляли в виде суточных кривых, на которых выбирали участки с термическим воздействием. Для этих участков за 1 ч до воздействия и 2–3 ч после

него записывали максимальные значения ЧСС с кривой с интервалом 5–15 мин, а затем обрабатывали статистически с помощью программ: Microsoft Excel, Статистика 6.0 и Призма 3.0. Средние арифметические значения ЧСС по нескольким моллюскам представляли в виде графиков и гистограмм с нанесёнными значениями стандартной ошибки среднего. В области изменения динамики ЧСС у животных из предположительно загрязнённых биотопов, по сравнению с референтными, контрольными, проводили анализ средних по методу Вилкоксона и используя *t*-тест. За достоверные принимали значения средних при уровне значимости $p \leq 0,05$. Тот же метод, а также критерий *F* Фарадея применяли для определения достоверности различий измеренных концентраций ТМ в гепатопанкреасе улиток.

Результаты и обсуждение

Для мониторинга экологического состояния береговых зон Невской губы были использованы ИСП ФЭС и ААС методы. В таблице 1 представлены результаты этих исследований.

Из данных таблицы 1 видно, что по накоплению ТМ в гепатопанкреасе улиток выделяется парк Ораниенбаум, расположенный в старинной усадьбе А. Меншикова. Здесь у улиток-биоиндикаторов обнаружено достоверное ($p \leq 0,05$) превышение концентрации всех исследованных металлов (Cu, Mn, Zn, Ni, Cd, Pb) по сравнению с концентрациями ТМ в референтной локации в посёлке Новая Ропша. Кроме этого, накопление ТМ в тканях улиток, обитающих здесь, превосходит эти величины и для других локаций. Исключение составляет парк Дубки, где концентрация Zn и Cd выше, чем в парке Ораниенбаум (табл. 1).

Медь является необходимым для жизнедеятельности организмов микроэлементом. Концентрация Cu у улиток *A. arbustorum* составляет 3–12 мг/кг в. в., что соответствует порядку данных, полученных для наземных моллюсков, в частности, для большого слизня [13]. Данная величина, очевидно, отражает количество гемоцианина, примерно одинаковое у моллюсков одного веса – 2,0 г. Найденные концентрации меди не являются токсичными для моллюсков, но при хроническом воздействии (5–6 лет) могут изменять клеточную проницаемость потенциал образующих ионов (Na^+ и K^+) и ингибировать фосфодиэстеразу, включённую в циклы АМР и ГМР_{цикл} [14]. Концентрация Mn в пищеварительной железе моллюсков *A. arbustorum* составляет около 40–80 мг/кг в. в., она примерно такая же, как у *Helix aspersa* (33–130 мг/кг в. в.) при искусственном содержании [15]. Найденные концентрации марганца не являются токсичными для моллюсков.

В референтной локации (пос. Новая Ропша) содержание Cd в пищеварительной железе улитки *A. arbustorum* составляет $0,05 \pm 0,01$ мг/кг, имеет тот же порядок, что в печени моллюска *H. aspersa* [15]. Повышение концентрации Cd в пищеварительной железе моллюсков на всех исследованных локациях не превосходит ОДК для суглинистых почв (1,0 мг/кг). Сравнение с ПДК и ОДК для почв использовали с целью выявления возможного источника поступления ТМ в организм улитки. Это позволяет примерно судить о величине возможного накопления ТМ и степени опасности его для животного. Учитывая, что содержание Cd в пищеварительной железе улитки *A. arbustorum* значительно ниже ОДК, можно предположить, что Cd не проявляет сильного токсического воздействия на *A. arbustorum*. Однако, накапливаясь в тканях в течение жизни, ТМ могут

Таблица 1 / Table 1
Концентрация тяжёлых металлов в пищеварительной железе улиток (мг/кг в. в.)
Heavy metals concentration in the digestive gland of snails (in mg/kg w. w.)

Название Designation	<i>n</i>	Cu	Mn	Zn	Ni	Cd	Pb
Пос. Новая Ропша Village New Ropsha	10	3,8±1,8	43,0±1,4	6,4±0,8	0,3±0,1	0,05±0,01	0,33±0,18
Парк Александрия Park Alexandria	10	6,0±0,6	57,0±3,3	5,7±1,4	0,26±0,01	0,15±0,01	0,39±0,11
Парк Ораниенбаум Park Oranienbaum	10	12,0±0,5	80,0±0,7	6,8±0,4	1,20±0,06	0,49±0,20	0,49±0,16
Парк Дубки Park Dubki	5	5,6±0,2	37,7±0,6	21,0±2,5	0,52±0,10	1,10±0,05	0,76±0,16

Таблица 2 / Table 2

Концентрация подвижных соединений тяжёлых металлов в почве исследованных локаций в мг/кг с. в.
Concentration of heavy metals mobile compounds in the soil of the studied locations in mg/kg d. w.

Название Designation	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb
Посёлок Новая Ропша Village New Ropsha	2,8±1,2	1,5±0,7	0,22±0,07	0,06±0,01	0,24±0,12
Парк Александрия Park Alexandria	2,8±0,8	1,3±0,5	0,17±0,01	0,22±0,01	0,20±0,10
Парк Ораниенбаум Park Oranienbaum	1,4±0,5	0,15±0,10	1,71±0,05	0,06±0,01	0,18±0,09
Парк Дубки Park Dubki	5,4±1,0	1,8±0,5	0,73±0,10	0,20±0,03	0,20±0,08

Таблица 3 / Table 3

Потенциальный экологический риск / Potential environmental risk (RI)

Название Designation	C_i/C_n					RI
	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	
Посёлок Новая Ропша Village New Ropsha	3,04	4,2	1,36	0,83	1,35	53,96
Парк Александрия Park Alexandria	2,14	4,56	1,52	0,68	1,95	54,53
Парк Ораниенбаум Park Oranienbaum	8,57	45,3	0,70	8,16	2,72	350,7
Парк Дубки Park Dubki	1,04	11,19	0,71	1,83	3,8	94,3

вызвать явные нарушения в ферментативной деятельности и синтезе ДНК.

Известно, что Ni принимает участие в ферментативных реакциях у животных и растений. Повышенное содержание Ni в почвах приводит к заболеваниям растений: изменению цвета листьев, плодов, а у животных – к замедлению роста и размножения, увеличению смертности [16]. Повышение концентрации Ni в пищеварительной железе улиток на всех исследованных участках не превосходит ОДК для суглинистых почв (20 мг/кг) и, следовательно, не вызывает заметных физиологических изменений. Однако нельзя пренебрегать синергетическим эффектом всех обнаруженных у улиток ТМ, которые в отдельности не превосходят допустимых концентраций, но, суммируясь, могут приводить к видимым нарушениям жизненно важных функций, таких как сердечная активность и систем её регуляции.

Для определения потенциального экологического риска (RI) мы использовали метод, предложенный в [10]. Для этого необходимы данные о загрязнении почвы. В таблице 2 представлены данные концентрации подвижных форм ТМ в почве локаций, где были собраны улитки.

Порядок данных, полученных нами, соответствует опубликованным ранее для почв районов г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области [17].

Соотношение C_i/C_n – загрязняющий фактор и RI – коэффициент потенциального экологического риска представлены в таблице 3. По данным Хакансона [10], основывающимся на вычислении RI в данной локации, при $RI \leq 100$ потенциальный риск низкий, при $100 \leq RI \leq 220$ – умеренный, при $220 \leq RI \leq 440$ – высокий, а при $RI > 440$ – очень высокий. В таблице 3 представлены значения RI для исследованных локаций. Во всех парках потенциальный экологический риск низкий, кроме парка Ораниенбаум, где он может быть оценён как высокий (табл. 3).

Физиологические опыты проводили в сентябре – октябре 2018 г. Улитки *A. arbustorum* крупного размера (2,0–2,5 см) полосатой морфы с коричнево-красной окраской раковины преобладают в этой популяции. После отбора и взвешивания на моллюсков наклеивали миниатюрные держатели, в которые закрепляли волоконно-оптические датчики для измерения ЧСС, и помещали в экспериментальную установку.

Парк Ораниенбаум (г. Ломоносов). При температуре в помещении 22 °С, средняя

ЧСС варьировала от 30 до 50 уд./мин и была относительно стабильна. Включение воздушного нагрева приводит к повышению ЧСС у улиток *A. arbustorum* из референтной точки (п. Новая Ропша), которое сохраняется всё время воздействия тепла (высокая терморезистентность). Выключение нагрева постепенно снижает температуру в террариуме и приводит к восстановлению ЧСС (рис. 2). Иначе реагируют на тепловой шок животные из парка Ораниенбаум. Эти моллюски хуже переносят кратковременный нагрев, начиная снижать ЧСС, часто ещё до выключения теплового стресса (рис. 2). Причём такая реакция наблюдается у большинства животных группы, которые демонстрируют пониженную терморезистентность. Статистическая обработка данных показала высокую достоверность ($p \leq 0,01$) реакции снижения ЧСС на момент выключения тепла у животных из загрязнённого биотопа (канал парка Ораниенбаум).

В момент выключения нагрева величины средней арифметической по 6 моллюскам из п. Новая Ропша (референтный участок) составила 87 ± 4 уд./мин, а животных из предположительно загрязнённого биотопа (берега канала парка Ораниенбаум) – 50 ± 5 уд./мин. Средние достоверно отличаются по t -тесту при уровне значимости $p \leq 0,05$ и критерию Вилкоксона при $p \leq 0,01$.

Парк Александрия (г. Петродворец). Моллюски *A. arbustorum*, собранные в траве около

павильона Коттедж, характеризуются преобладанием монохромных (коричневых) полосных форм. Незначительное накопление ТМ в тканях улиток и высокая терморезистентность показывают, что их функциональное состояние лучше, чем у животных из парка Ораниенбаум. В момент выключения нагрева величина средней арифметической по 6 моллюскам из парка Александрия составила 65 ± 11 уд./мин, а у животных из загрязнённого биотопа (парк Ораниенбаум) – 50 ± 7 уд./мин. Средние достоверно отличаются по t -тесту при уровне значимости $p \leq 0,05$ и критерию Вилкоксона при $p \leq 0,05$.

Парк Дубки. Парк Дубки располагается на северо-восточном побережье Финского залива. Растительный покров не отличается от парка Петродворца. Улитки *A. arbustorum* имели крупный размер (2–2,5 см) и коричнево-красную окраску раковины. Включение воздушного нагрева приводит к повышению ЧСС у улиток из парка Дубки, так и из п. Новая Ропша, которое сохраняется всё время воздействия тепла, демонстрируя высокую терморезистентность у животных из обеих групп. Выключение нагрева приводит к снижению ЧСС. Величины средних ЧСС после выключения тепла достоверно не отличаются.

Заключение

Наши исследования выявили низкую терморезистентность у улиток, собранных

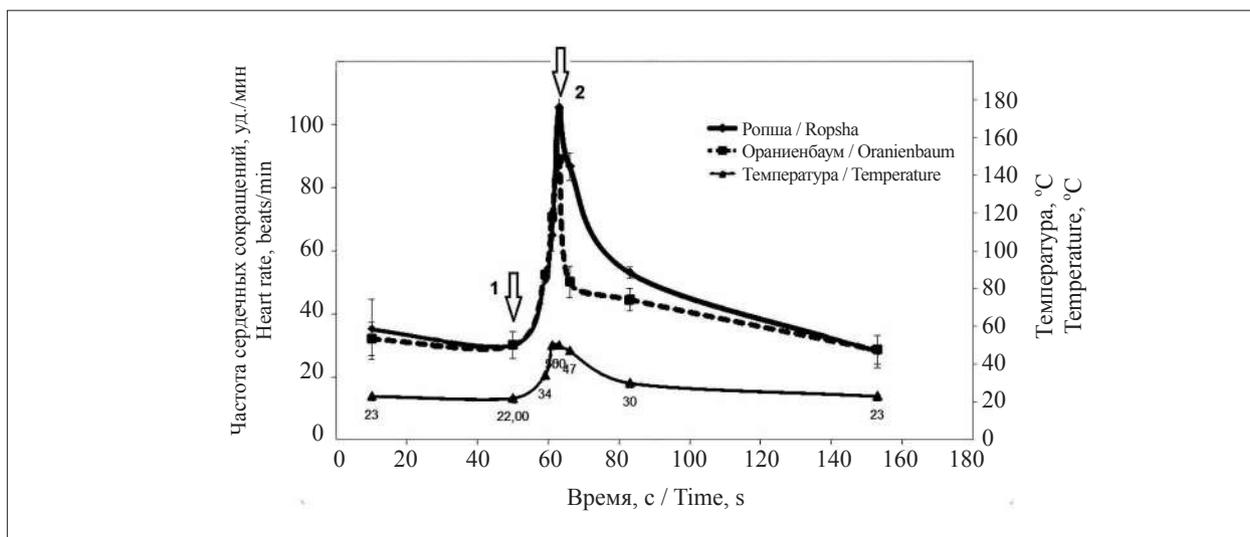


Рис. 2. Изменения средней ЧСС ($n = 6$) при 20 мин тепловом шоке у контрольных моллюсков (п. Новая Ропша) и предположительно загрязнённого биотопа (канал парка Ораниенбаум).

Нижняя кривая – изменение температуры. Вертикальные линии над точками – стандартное отклонение средней. Включение нагрева – 1; выключение нагрева – 2

Fig. 2. Changes in mean heart rate ($n = 6$) at a 20-minute heat shock in control mollusks (village Novaya Ropsha) and presumably contaminated biotope (channel of Oranienbaum park, dashed). The bottom curve is the temperature change. The vertical lines above the dots are the standard deviation of the mean. Heating on – 1; heating off – 2

по берегам канала парка Ораниенбаум, что связано с повышенным содержанием ТМ в гепатопанкреасе улиток, обитающих в зоне потенциально высокого экологического риска. Как правило, ТМ являются не единственными загрязнителями в этой локации. Расположенная недалеко оживлённая автомобильная трасса может являться источником органических загрязнителей, которые, накапливаясь в почве и растительности, также могут попадать в организм улиток.

Таким образом, определение терморезистентности по динамическим параметрам ЧСС является достаточно чувствительным методом определения измерения функционального состояния животных-биоиндикаторов, на основе которого можно, на наш взгляд, судить об антропогенном воздействии в исследованной локации. При этом, как показали наши исследования, полученные данные хорошо коррелируют с данными, полученными стандартными аналитическими методами определения концентрации ТМ в тканях животных-биоиндикаторов и результатами вычисления потенциального экологического риска.

Работа выполнена на научном оборудовании Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» и «Центра химического анализа и материаловедения» Научно-исследовательского парка Санкт-Петербургского государственного университета.

References

1. Shalanki I. Biomonitoring of the natural environment // Journal of General Biology. 1985. V. 46. No. 9. P. 743–752 (in Russian).
2. Bondareva O.V., Orlova M.I., Abramson N.I. Genetic variability of the wood snail *Arianta arbustorum* L. in the Leningrad region according to the analysis of a fragment of the COI mitochondrial gene sequence // Ecological Genetics. 2016. V. 14. No. 2. P. 19–27 (in Russian). doi: 10.17816/ecogen14219-27
3. Zeifert D.V., Khokhutkin I.M. Ecology of the bush snail *Fruticocola fruticum*. Moskva: KMK Scientific Publishing Association, 2009. 92 p. (in Russian).
4. Makeeva V.M., Belokon M.M., Malyuchenko O.P. Assessment of the state of the gene pool of natural populations of invertebrates in the fragmented landscape of Moscow and the Moscow region (by the example of a bush snail, *Bradybaena fruticum* (Mull.)) // Genetics. 2005. No. 11. P. 1495–1510 (in Russian). doi: 10.1134/S1022795406050073
5. Snegin E.A. Ecological and genetic aspects of the distribution of *Bradybaena fruticum* (Mollusca, Gastropoda, Pulmonata) in the elements of the forest-steppe landscape // Ecology. 2005. No. 1. P. 39–47 (in Russian). doi: 10.1007/s11184-005-0006-1
6. Kholodkevich S.V., Kamardin N.N., Lyubimtsev V.A., Ivanov A.V., Kornienko E.L. Bioindication of air pollution based on biomarkers of the cardiorespiratory system of the mollusk *Achatina fulica* // Doklady akademii nauk. 2010. V. 430. No. 5. P. 715–717 (in Russian). doi: 10.1134/S0012496610010187
7. Vaufleury A.G.D., Pihan F. Methods for toxicity assessment of contaminated soil by oral or dermal uptake in land snails: metal bioavailability and bioaccumulation // Environ. Toxicol. Chem. 2002. V. 21. P. 820–827. doi: 10.1897/1551-5028(2002)021<0820:mftaoc>2.0.co;2
8. Dallinger R., Berger B., Triebkorn-Köhler R., Köhler H. Soil biology and ecotoxicology // The Biology of Terrestrial Molluscs / Ed. G.M. Barker. Wallingford: CABI Publ., 2001. P. 489–525. doi: 10.1007/s00253-010-2632-1
9. De Vaufleury A., Coeurdassier M., Pandard P., Scheifler R., Lovy C., Crini N., Badot P.M. How terrestrial snails can be used in risk assessment of soils // Environ Toxicol Chem. 2006. V. 25. P. 797–806. doi: 10.1897/04-560r.1
10. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach // Water Res. 1980. V. 14. P. 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
11. Cook L.M., King J.M.B. Some data on the genetics of shell-character polymorphism in the snail *Arianta arbustorum* // Genetics. 1966. V. 53. No. 3. P. 415–425. doi: 10.1093/genetica/53.3.415
12. Kholodkevich S.V., Ivanov A.V., Kurakin A.S., Kornienko E.L., Fedotov V.P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // Environmental Bioindicators. 2008. V. 3. No. 1. P. 23–34. doi: 10.1080/15555270701885747
13. Oganesyan I.S., Khachatryan K.S., Arutyunova L.D. Dynamics of accumulation of heavy metals in the body of mollusks (Mollusca, Limacidae) in Vanadzor // Biological Journal of Armenia. 2011. V. 3. No. 63. P. 43–48 (in Russian).
14. Berridge M.J., Irvine R.F. Inositol phosphates and cell signalling // Nature. 1989. V. 341. P. 197–205.
15. Bordean D-M., Nika D.V., Yarmnescu M., Banatean-Dunea I., Garsen I.I. Soil manganese enrichment from industrial inputs: A gastropod perspective // PloSONE. 2014. V. 9. No. 1. Article No. e85384. doi: 10.1371/journal.pone.0085384
16. Scott-Fordsmand J.J. Toxicity of nickel to soil organisms in Denmark // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology: Continuation of Residue Reviews / Eds. G.W. Ware, H.N. Nigg, A. Bevenue. New York: Springer, 1997. P. 1–34. doi: 10.1007/978-1-4612-2264-4_1
17. Report on the sanitary-epidemic situation in the Leningrad region in 2001. The results of laboratory research of the soil on the territory of the Leningrad region. P. 7–54 [Internet recourse] http://www.medline.ru/public/art/tom3/art4_12.phtml (Accepted: 21.01.2001) (in Russian).

**Мониторинг зарастания заброшенных земель
сельскохозяйственного назначения
по спутниковым снимкам высокого разрешения**

© 2022. Е. А. Домнина^{1,2}, к. б. н., с. н. с., доцент,
Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент, А. С. Тимонов^{1,2}, н. с., инженер,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, 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: usr11493@vyatsu.ru

Приведены результаты мониторинга зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель (залежей) древесно-кустарниковой растительностью по разновременным спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения, сделанных в разные фенофазы. Показана динамика зарастания за более чем 12 лет на примере трёх различных участков, расположенных в подзоне южной тайги. Анализ снимков позволил провести оценку структурных параметров формирующейся на залежах древесно-кустарниковой растительности. Выявлена пространственно-временная гетерогенность постагрогенного естественного возобновления древесной растительности на локальном уровне. Зарастание небольших залежей, большей частью окружённых стеной леса, происходит практически одновременно по всей площади. На залежи с большой площадью и незначительной стеной леса зарастание происходит от стены леса, со временем постепенно удаляясь от неё.

Полученные результаты позволяют проследить динамику развития естественного древесно-кустарникового покрова на заброшенных сельскохозяйственных угодьях, оценить состояние и значение произрастающих на залежи лесных насаждений.

Ключевые слова: мониторинг, спутниковые снимки, фенофазы растений, заброшенные земли сельскохозяйственного назначения, залежь, стена леса, древесно-кустарниковая растительность.

**Monitoring of overgrowing of abandoned
agricultural lands using high-resolution satellite images**

© 2022. E. A. Domnina^{1,2} ORCID: 0000-0002-5063-8606, T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X,
A. S. Timonov^{1,2} ORCID: 0000-0001-8560-3051, 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: usr11493@vyatsu.ru

The results of monitoring the overgrowth of abandoned agricultural lands (deposits) with trees and shrubs on the basis of multi-temporal ultra-high resolution satellite images taken in different phenophases are presented. The dynamics of overgrowing for more than 12 years is shown on the example of three different sites located in the subzone of the southern taiga. An analysis of the images made it possible to assess the structural parameters of the tree and shrub vegetation forming on the fallows. Spatio-temporal heterogeneity of post-agrogenic natural regeneration of woody vegetation at the local level was revealed. The overgrowing of small areas, mostly surrounded by a forest wall, occurs almost simultaneously over the entire area. On a fallow with a large area and an insignificant forest wall, overgrowing occurs from the forest wall, gradually moving away from it over time. At the same time, the predominance of deciduous trees near the forest wall is replaced by the predominance of conifers as they move away from it. The results obtained make

it possible to trace the dynamics of the development of natural tree and shrub cover on abandoned agricultural lands, to assess the state and importance of forest plantations growing on the fallow.

Keywords: monitoring, satellite imagery, different phenophases, abandoned agricultural land, fallow, forest wall, trees and shrubs.

Социально-экономический кризис, поразивший сельское хозяйство России в начале 1990-х годов, привёл к тому, что многие пастбища, пашни и сенокосы перестали использоваться. Такие участки начали зарастать древесно-кустарниковой растительностью. При этом за 25–30 лет во многих местах сформировались полноценные лесные насаждения. Однако последствия постагрогенной сукцессии на сельскохозяйственных землях не получили должной оценки ни с экологической, ни с хозяйственной точки зрения. Это обусловлено тем, что до сих пор не установлены реальные масштабы зарастания сельскохозяйственных земель и характеристики формирующихся на этих землях лесных насаждений [1]. Согласно ст. 79 Земельного кодекса Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ сельскохозяйственные угодья – это пашни, сенокосы, пастбища и залежи. Залежи – это заброшенные необрабатываемые сельскохозяйственные земли, на которых происходит зарастание естественной растительностью, в том числе травянистой, древесной и кустарниковой.

Выведение из оборота сельскохозяйственных земель и их переход в залежи является значимым изменением наземного покрова и структуры использования земель во многих странах мира. Только в России в течение XX века из оборота было выведено около 70 млн га сельскохозяйственных угодий, из них около 2/3 – в ходе кризиса второй половины 1980–1990-х гг. [2–5].

Зарастание залежных почв кустарниковой и древесной растительностью приводит к снижению почвенного плодородия посредством усиления подзолистого процесса [6]. В результате этого ухудшается большинство показателей плодородия. В работе [7] показана отрицательная динамика изменения агрохимических показателей при зарастании почв: степень кислотности, сумма поглощённых оснований, степень насыщенности основаниями, развитие подзолистого и торможение дернового процессов.

Одним из основных направлений развития государственной системы мониторинга сельского хозяйства является определение нарушенных земель, которое может осуществляться с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [8]. Многочис-

ленные современные исследования в области дистанционной индикации и мониторинга выведенных из оборота сельскохозяйственных земель по данным ДЗЗ сфокусированы на анализе закономерностей пространственно-временной дифференциации изменений структуры сельскохозяйственного использования земель, определения времени вывода из оборота и характера зарастания залежных земель на макрорегиональном и региональном уровнях [2, 9–14]. Однако на локальном уровне в подзоне южной тайги этот вопрос не проработан.

Цель данной работы – оценка динамики зарастания древесно-кустарниковой растительностью заброшенных земель сельскохозяйственного назначения в подзоне южной тайги и выявление пространственно-временной неоднородности этого процесса на локальном уровне на основе анализа разновременных спутниковых снимков сверхвысокого разрешения (от 0,5 м).

Объекты и методы исследования

Для изучения пространственно-временных особенностей протекания зарастания залежей выбрано 3 участка, расположенных на территории Кировской области в подзоне южной тайги. Эти участки в прошлом использовались под пашню, а в настоящее время заросли естественной растительностью, но продолжают числиться как земли сельскохозяйственного назначения и являются залежными землями (залежами). Информация об отнесении участков к землям сельскохозяйственного назначения получена из открытого интернет ресурса «Публичная кадастровая карта Российской Федерации».

Участок 1 (рис. 1) расположен на небольшом увале, вытянутом в северо-восточном направлении, ось которого погружается на северо-восток. В конце участка увал практически выравнивается. Юго-восточный склон увала, относительно северо-западного, более пологий. С юго-востока участок ограничен лесом, с северо-запада – железной дорогой, с северо-востока – пашней, с юго-запада – пашней и небольшим населённым пунктом. Площадь залежи – 78,5 га.

Участок 2 (рис. 2) расположен на ровной территории, протяжённостью около 400 м, большей своей частью вдающийся в лес на глубину до 160 м. С севера залежь ограничена сенокосом, с других сторон – лесом. Площадь участка немногим более 4 га.

Участок 3 (рис. 3) практически горизонтальный с небольшими локальными понижениями, расположен внутри лесного массива, небольшая его часть на западе примыкает к автодороге. Залежь имеет площадь около 13 га.

Таким образом, исследуемые участки характеризуются разными площадями, почвенно-растительными условиями, микрорельефом (локальные пониженные и повышенные участки), расположением по отношению к инфраструктуре, к лесным массивам.

В качестве данных ДЗЗ были использованы ряды спутниковых снимков с аппарата WorldView-2 сверхвысокого пространственного разрешения (0,5–1,0 м), находящихся в открытом доступе на интернет ресурсе Google Earth. Для участка 1 было использовано 17 спутниковых снимков, охватывающих временной интервал с мая 2010 г. по август 2021 г., сделанных в различные сезоны года, для участков 2 и 3 – по 14 спутниковых снимков, охватывающих временной интервал с мая 2004 г. по октябрь 2021 г.

Дешифрирование снимков с выявлением на залежах древесно-кустарниковой растительности осуществляли по прямым дешифровочным признакам: фототон, цвет, геометрия (форма, тень, размер), структурно-текстурный тип рисунка.

При анализе результатов дешифрирования последовательных временных рядов снимков с учётом сезона года (фенологической фазы) степень зарастания определяли по относительной плотности полога древостоя от появления на ровном фоне залежи точек, отражающих единичные кроны небольших деревьев и кустарников, их сгущения вплоть до полного смыкания крон. По характеру текстурного рисунка, цвету и фототону определяли видовой состав древесной растительности с последующей идентификацией установленных объектов на местности в полевых условиях.

Результаты и обсуждение

Прекращение хозяйственного использования земель приводит к появлению растительности, характерной для той или иной зоны, существовавшей до вмешательства человека и введения этих земель в сельскохозяйственный

оборот. Постагрогенная сукцессия залежи предопределяется её размерами (площадью), рельефом местности, расположением относительно леса и его типом. Анализ временных рядов спутниковых снимков (рис. 1–3, см. цветные вкладки I–III) позволяет проследить динамику зарастания залежи.

Участок 1 (рис. 1, см. цветную вкладку I). Стена ближайшего леса, ограничивающая залежь с юго-востока, извилистая почти параллельна оси увала и чётко отделяется от залежи. На всех снимках она тёмно-зелёного цвета, бугорчатой текстуры; в то время как на осенних снимках – с редкими светлыми пятнами. При полевом обследовании установлено, что данный фитоценоз – сосново-еловый лес с примесью пихты и берёзы, и имеет возраст более 70 лет.

На снимке от 13 мая 2010 г. (рис. 1.1) эта залежь имеет полосчато-пятнистую структуру (сохраняется направление распашки) от ярко-зелёного до соломенно-жёлтых оттенков, что может являться признаком зелёной и пожухлой (прошлогодней) травы. Вдоль юго-восточной границы участка непосредственно к стене леса примыкают ярко зелёные полосы шириной до 30–60 м микробугорчатой текстуры. Эти полосы – несомкнутые кроны лиственных деревьев, вытягивающиеся в цепочки по направлению пахотных борозд.

Через пять лет (рис. 1.2) эти полосы микробугорчатости выглядят уже как ровная поверхность, свидетельствующая о смыкании крон деревьев. На расстоянии от 60 до 150 м от стены леса наблюдается мелкобугорчатая текстура поверхности, которая далее на северо-запад (до 250 м) постепенно переходит в россыпь точек. А ещё через два года (рис. 1.3) эта россыпь сменяется мелкобугорчатой текстурой, а россыпь точек сдвигается до 500 м к северо-западу от стены леса. Тёмно-зелёные точки местами образуют облака точек, вытянутые по направлению борозд вспашки. Бóльшее количество точек располагается на склоне северо-западной экспозиции увала, а на юго-восточном склоне более развиты мелкобугорчатые текстуры. Контур распространения мелкобугорчатой текстуры, в общем, параллелен границе леса.

Снимок от 12.10.2020 (рис. 1.4) отражает фенологическую фазу, когда лиственные деревья и кустарники приобрели ярко-жёлтую окраску в отличие от хвойных, которые остались тёмно-зелёными. На этом снимке жёлтая полоса мелкобугорчатой структуры на расстоянии 180–200 м от стены леса до-

вольно резко сменяется мелкобугорчатой с отдельными проявлениями точечных структур в виде хаотично разбросанных тёмно-зелёных точек, преимущественно на склоне увала северо-западной экспозиции.

Полевые наблюдения показали, что непосредственно к стене леса примыкает ивняк разнотравный с берёзой (рис. 1.4a), имеющий на большей части залежи плотный (с плотностью 0,5–2,0 м) сомкнутый древостой высотой до 10–12 м. Под его пологом встречаются отдельные деревца ели и сосны в угнетённом состоянии (рис. 1.4a). На отдельных участках наблюдается упорядоченное расположение деревьев вдоль линий распашки.

По мере удаления от стены леса (30–50 м) ивняк разнотравный с берёзой сменяется чистым березняком высотой 12–15 м с подростом ели и редко сосны высотой 5 м, возрастом 10–12 лет. Среднее расстояние между деревьями 5–8 м. Жёлтые точки на спутниковом снимке от 12.10.2020 (рис. 1.4) идентифицируют отдельные кроны берёз, участками смыкающиеся в единый массив (рис. 1.4, 1.4b), образуя полосу шириной 150–250 м на удалении от стены леса до 50 м. Следует обратить внимание на то, что граница полосы зарастания в основном параллельна границе леса и постепенно расплывается по мере удаления от неё.

Березняк сменяется куртинами (рис. 1.4c), состоящими из ели и сосны, редко – берёзы. Высота елей и сосен здесь достигает 10 м, возраст – 10–12 лет, среднее расстояние между деревьями 3–5 м. Между куртинами произрастают кустарники: ива, черёмуха, рябина.

При дальнейшем удалении от стены леса уменьшается высота деревьев до 2–3 м, возраст – до 7–8 лет, среднее расстояние между ними увеличивается до 8–10 и более метров (рис. 1.4d).

Анализ последовательных разновременных спутниковых снимков показал, что в течение 2–3 лет после прекращения сельскохозяйственного использования данного участка зарастание залежи древесной растительностью началось от стены леса, где сформировалось несколько кластеров с очень высокой плотностью ивового и берёзового подроста, что указывает на повышенную увлажнённость почв. Кроны деревьев здесь сомкнулись через 4–5 лет после прекращения сельскохозяйственного использования земель. Сильная загущённость ивняка не позволила достичь верхнего яруса сосне и ели, которые находятся под его пологом в виде угнетённых растений (рис. 1.4a). Дальнейшее зарастание

древесной растительностью происходило от стены леса к центральной части залежи и по направлению к её границам. Причём фронт зарастания в общем виде параллелен извилистой стене леса на юго-восточной границе залежи (рис. 1.2, 1.3). Это может свидетельствовать о том, что поставщиком семенного материала является этот лес. Постепенное сокращение возраста сосен с 10–12 до 7–8 лет и высоты хвойных деревьев по мере удаления от стены леса свидетельствует о том, что процесс распространения древесной растительности на залежи продолжается в настоящее время с некоторым замедлением.

Видовой состав деревьев на этой залежи и интенсивность (скорость) её зарастания определяется несколькими основными факторами: видовым составом коренного леса, относительной увлажнённостью, экспозицией склона (северо-западный склон менее заросший), удалённостью от стены леса.

Участок 2 с трёх сторон окружён лесом, который чётко отделяется от залежи на всех снимках. При полевых исследованиях выявлено, что примыкающий к залежи лесной массив берёзово-еловый с участием в древостое отдельных сосен. Лес возвышается над деревьями, выросшими на залежи, примерно на 5–6 м (рис. 2.6a, см. цветную вкладку II).

На самом раннем спутниковом снимке, датированном началом мая 2004 г. (рис. 2.1) прилегающее к автодороге обрабатываемое поле имеет однотонный полосчатый зелёный цвет разных оттенков. Залежь, примыкающая к этому полю, имеет полосчато-пятнистую текстуру от бледно-зелёного до соломенного цвета, что является отражением распашки прошлых лет и наличия зелёной и пожухлой прошлогодней травы. На этом фоне в центре западной части залежи видно несколько одиночных точек, которые можно идентифицировать как отдельные небольшие деревья или кустарники.

На снимке 2005 г. (рис. 2.2) в центральной части залежи видно облако хаотичного скопления отдельных зелёных точек, отстоящих друг от друга на 2–10 м, занимающего примерно 25% от её общей площади.

На снимках 2010 г. (начало марта) и 2016 г. (начало мая), снятых в фенофазы, когда отсутствует листва (рис. 2.3, 2.4), хорошо дешифрируются листовенные (серые) и хвойные (зелёные) деревья. Последние образуют участок мелкобугристой текстуры, который на снимке 2005 г. выглядел как облако точек. Также по чистому белому (рис. 2.3) или бледно-зелёному

(рис. 2.4) полю хорошо дешифрируются неза-росшие древесно-кустарниковой растительностью поляны. Площадь зарастания деревьями и кустарниками в 2010 г. составила порядка 55–60%, а в 2016 г. – порядка 85%.

На июльском снимке 2021 г. (рис. 2.5) залежь имеет мелкобугристый текстурный рисунок с просветами полей. На нём практически невозможно отличить лиственные деревья от хвойных. В то же время на снимке отчётливо видны поляны по ровному зелёному цвету. На октябрьском снимке этого же года (рис. 2.6) лиственные деревья и кустарники очень хорошо дешифрируются по ярко-жёлтым и серым пятнам, а хвойные деревья – по ярко-зелёным. Об относительном возрасте деревьев в какой-то мере можно судить и по бугристости, отражающей величину кроны деревьев. На залежи бугристость по размеру гораздо меньше, чем на примыкающем к ней лесу. В 2021 г. площадь зарастания залежи составила порядка 90%.

По результатам полевого обследования дешифрируемые на октябрьском снимке (рис. 2.6) зелёные точки – это хвойные деревья, которые представлены сосной обыкновенной с диаметром ствола 11–25 см и елью – диаметром до 10 см, возраст 15–20 лет (рис. 2.6б и 2.6с); ярко-жёлтые – берёза, диаметром от 10 до 20 см; серые – ивняк. Дешифрируемые на снимках поляны (рис. 2.6б) представляют собой переувлажнённые участки, покрытые исключительно травянистой растительностью, с преобладанием в травостое купальницы европейской, купыря лесного и таволги вязолистной.

Анализ последовательных разновременных спутниковых снимков показал следующее. Пожухлая трава и наличие деревьев или кустарников (рис. 2.1) свидетельствует о том, что данный участок не обрабатывался примерно с 2000–2002 гг. Первоначально зарастание залежи происходило хвойными деревьями в центральной части, а затем по периферии участка берёзой пушистой и ивой. Сравнивая снимки 2016 и 2021 гг. следует отметить, что площадь зарастания залежи за этот период практически не изменилась (поляны остались примерно в тех же контурах), т. е. к 2014–2015 гг. завершилось зарастание залежи древесной растительностью. Начиная с этого времени происходил рост деревьев в высоту, увеличение в диаметре стволов и кроны, и естественное изреживание древостоя (рис. 2.6с).

Залежь на **участке 3** практически со всех сторон ограничена лесом, проявляющемся на снимке начала мая 2004 г. (рис. 3.1,

см. цветную вкладку III) бугорчатым текстурным рисунком серого с участками зеленоватого тона. При полевом обследовании установлено, что этот фитоценоз – берёзовый с примесью сосны и ели. На этом же снимке залежь выглядит как поле общего жёлтовато-серого фона, отражающего цвет пожухлой прошлогодней травы, с тонкими полосками и хаотично разбросанными точками (иногда их скоплениями до 10–25 м) грязно-зелёного цвета, местами расплывающимися, которые, вероятно, обусловлены кустарниками и мелкими деревьями, произрастающими по бороздам вспашки, предшествующей прекращению сельскохозяйственного использования угодья.

На спутниковом снимке от 13.10.2005 (рис. 3.2) видно, что количество точек увеличилось, а также увеличилась площадь их скоплений. Общая площадь зарастания древесно-кустарниковой растительностью незначительно увеличилась (до 30% от общей площади залежи). При этом выявляются участки концентрации точек зелёного цвета в северо-восточном углу залежи (до 60 м в диаметре), в восточной части (до 40 м) и небольшое (до 20 м) на юго-западе. Зимний снимок 2010 г. (рис. 3.3) демонстрирует зарастание залежи преимущественно лиственными деревьями, которые по тени на снегу отличаются от хвойных отсутствием облиственной кроны. Также отчётливо видны поляны, не занятые древесно-кустарниковой растительностью. Общая площадь зарастания залежи составила немногим более 80%.

На снимке начала мая 2016 г. (рис. 3.4) видно, что площади зарастания по сравнению с предыдущим снимком увеличились не существенно. Однако различить отдельные деревья уже не представляется возможным, что обусловлено увеличением размеров кроны и их смыканием. Также отчётливо выделяются как и на снимке 13.10.2005 участки концентрации зелёных точек, которые увеличены в размерах и иногда, сливаясь, приобрели бугорчатую текстуру (рис. 3.2) зелёного цвета, отражающую смыкание кроны хвойных деревьев, в отличие от лиственных, имеющих на снимке серый цвет.

Снимки 2018 г. (рис. 3.5) и 2021 г. (рис. 3.6) показывают, что площадь зарастания залежи древесно-кустарниковой растительностью по сравнению с 2016 г. практически не увеличилась, а сомкнутость кроны существенно возросла. На снимке начала сентября 2018 г. различить по цвету хвойные и лиственные деревья не представляется возможным, в то вре-

мя как на снимке октября 2021 г. отчётливо видны три преобладающих цвета крон: жёлтый, серый и зелёный. При полевом обследовании установлено, что жёлтый цвет соответствует кронам берёз, серый – ивняка, а зелёный – ели и сосны.

В целом залежь к настоящему времени заросла в основном берёзой; в пониженных участках преимущественно ивой (рис. 3.6a). Хвойные деревья образуют небольшие куртины, но нередко одиночные деревья сосны и ели возрастом от 8 до 14 лет встречаются среди берёз (рис. 3.6b). На полянах (рис. 3.6c) произрастает травянистая растительность, характерная для переувлажнённых территорий (лютик ползучий, бодяк разнолистный, незабудка болотная).

Анализ временного ряда спутниковых снимков залежи на участке 3 позволяет говорить о том, что участок, вероятно, был заброшен в 2002 г. Заращение его началось с микропонижений, на которых начала разрастаться ива. Слабо увлажнённые участки заросли берёзой, а небольшие повышения – сосной. Небольшие поляны остаются не занятыми древесно-кустарниковой растительностью в течение длительного времени (более пяти лет), возможно вследствие неблагоприятных почвенных условий. К 2012–2014 гг. практически прекратилось заращение залежи. После этого, также как и на участке 2, происходил рост деревьев в высоту, увеличение диаметра их стволов и разрастание кроны.

Обобщая результаты мониторинга зарастания залежей на трёх участках, имеющих отличительные особенности, можно выделить следующие закономерности.

– Границы и следы обработки почвы и соответственно линейный структурный рисунок изображения пахотных сельскохозяйственных площадей сохраняются многие годы. Появление на спутниковых снимках локальной размазанной пятнистости, особенно заметной на весенних снимках, свидетельствует о признаках прекращения обработки и заброшенности угодий. Возникновение в текстуре весенних и летних снимков неоднородно расположенных пятен и точечных структур отражает начало зарастания травянистой и древесно-кустарниковой растительностью.

– Основным индикатором пространственно-временной гетерогенности протекания постагрогенной сукцессии на залежи является динамика расширения площади зарастания и увеличение крон деревьев до их смыкания,

которые направленно возрастают с течением времени.

– Пространственное распространение и формирование на залежи различных видов древостоя происходит в зависимости от расположения их по отношению к соседним лесным массивам, которые являются основными поставщиками семенного материала.

Заращение сельскохозяйственных угодий древесно-кустарниковой растительностью на начальных стадиях дешифрируется на спутниковых снимках точечной структурой зачашую по направлению полосчатости распашки. В последующем она сменяется разной степенью бугристости текстурного рисунка. При этом отсутствует структурированность в распространении текстурных особенностей, а также резких цветовых переходов, связанных с распашкой земли. При этом полосчатый структурный рисунок залежи может сохраняться на долгие годы.

В зависимости от местоположения участка и расстояния до ближайших лесных массивов, заращение древесно-кустарниковой растительностью начинается уже через 2–3 года после прекращения обработки сельхозугодья (распашки или регулярного сенокосения). Существенную роль в видовом составе зарастающей залежи, несомненно, играют типы почв и их увлажнённость.

Спутниковые снимки, сделанные в разные сезоны и в разные фазы, как было показано нами ранее [15–17], позволяют довольно определённо различать по цветовой гамме лиственные деревья от хвойных, а также отдельные виды лиственных деревьев, поскольку их фазы не совпадают.

Заключение

Анализ разновременных спутниковых снимков сверхвысокого разрешения, сделанных в разные фазы и размещённых в открытом доступе на интернет ресурсе Google Earth, позволил провести оценку структурных параметров формирующейся на залежах древесно-кустарниковой растительности. Показана динамика зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель за период с 2004 г. по настоящее время на примере трёх различных по размерам и особенностям участков, расположенных в подзоне южной тайги.

Выявлена пространственно-временная гетерогенность постагрогенного возобновления древесной растительности на локальном уровне. Она проявилась в том, что заращение

древесно-кустарниковой растительностью начинается уже через 2–3 года с момента прекращения сельскохозяйственного использования земель. При этом на небольших по площади залежах (менее 15 га) и большей частью окружённых лесом, зарастание происходит менее чем за 10–12 лет. А на большей площади с ограниченной стеной леса этот процесс более растянут во времени. Зарастание на ограниченных залежах (участки 2 и 3) происходит практически одновременно по всей площади, распределение видов растительности определяется почвенными условиями. В случае же залежи с большой площадью (участок 1) и незначительной по протяжённости стеной леса, зарастание происходит от стены леса, постепенно удаляясь от неё. При этом преобладание лиственных деревьев у стены леса сменяется преобладанием хвойных по мере удаления от неё.

Полученные результаты позволяют проследить динамику развития естественного древесно-кустарникового покрова, формирующегося на ранее обрабатываемых, но заброшенных сельскохозяйственных угодьях, оценить состояние и значение произрастающих на залежи лесных насаждений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.A. Dynamics of agricultural lands in Russia in the 20th century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils. Moskva: GEOS, 2010. 426 p. (in Russian).
2. Medvedev A.A., Telnova N.O., Kudikov A.V. Remote highly detailed monitoring of the dynamics of overgrowing of abandoned agricultural lands with forest vegetation // *Voprosy lesnoy nauki*. 2019. V. 2 (3). P. 1–12 (in Russian). doi: 10.31509/2658-607X-2019-2-3-1-12
3. Lugo A.E. Emerging forests on abandoned land: Puerto Rico's new forests // *Forest Ecology and Management*. 2004. No. 190. P.145–161. doi: 10.1016/J.FORECO.2003.09.012
4. Liepins K. Naturally afforested agricultural lands in Latvia – assessment of available timber resources and potential productivity // *Environmental engineering. Proceedings of the 7 th international conference*. 2008. P. 194–199.
5. Bogomazov S.V., Lyandenburskaya A.V., Levin A.A., Efremova E.V., Tkachuk O.A. Real-time monitoring of agricultural land using GIS technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. Article No. 032025. doi: 10.1088/1755-1315/839/3/032025
6. Belousova A.P., Chashchin A.N. Evaluation of the intensity of overgrowing of soils of agricultural land with forest vegetation according to remote sensing data // *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. 2018. V. 28. No. 3. P. 269–278 (in Russian).
7. Ivanov D.V., Kulikov S.V., Tsarevsky E.A., Lugansky V.N. Dynamics of some agrochemical indicators of soils when agricultural fields are overgrown with woody vegetation in the conditions of the Baikalovsky district of the Sverdlovsk region // *Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii*. 2016. No. 10. P. 11–15 (in Russian). doi: 10.1134/S1064229317110096
8. Budanov K.A., Denisov P.V., Lupyan E.A., Martyanov A.S., Sereda I.I., Troshko K.A., Tolpin V.A., Bartalev S.A., Khvostikov S.A. Block of work with Earth remote sensing data of the Unified federal information system on agricultural lands // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. No. 3. P. 171–182 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-171-182
9. Alcantara C., Kuemmerle T., Baumann M., Bragina E.V., Griffiths P., Hostert P., Knorn J., Müller D., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Sieber A., Radeloff V.C. Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data // *Environmental Research Letters*. 2013. V. 8. No. 3. [Internet resource] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035035> (Accessed: 23.07.2018). doi: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-12
10. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 163. P. 312–325. doi: 10.1016/j.rse.2015.03.028
11. Koroleva N.V., Tikhonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriluk N.A., Pugachevsky A.V. Assessment of the scale of overgrowing of non-forest lands in the Smolenskoye Poozerye National Park for 25 years using Landsat satellite data // *Lesovedenie*. 2018. No. 2. P. 83–96 (in Russian).
12. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // *Scientific Data*. 2018. No. 5. Article No. 180056. doi: 10.1038/sdata.2018.56
13. Evstratova L.G. Peculiarities of monitoring agricultural lands by different types of aerospace images // *Interekspo Geo-Sibir'*. 2019. V. 4. No. 2. P. 205–212

(in Russian). doi: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-205-212

14. Denisova A.Yu., Egorova A.A., Sergeev V.V., Kavelenova L.M. Development of requirements for multi-spectral data of remote sensing of the Earth in the problem of examination of overgrowing of arable lands with trees and shrubs // *Komp'yuternaya optika*. 2019. V. 43. No. 5. P. 846–856 (in Russian). doi: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856

15. Domnina E.A., Timonov A.S., Kantor G.Ya., Kislitsyna A.P., Savinykh V.P. Experience of detailed mapping of floodplain meadow vegetation // *Theoretical*

and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 42–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-042-049

16. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Thematic interpretation of high-resolution satellite images of vegetation based on field research data // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 41–45. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-041-045

17. Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Study of reforestation based on high-resolution satellite imagery // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-038-043

Техногенное воздействие сточных вод на гидрохимический состав р. Ангары

©2022. В. И. Полетаева, к. г.-м. н., с. н. с., М. В. Пастухов, к. б. н., с. н. с.,
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а,
e-mail: alieva@igc.irk.ru

Многолетнее техногенное воздействие на р. Ангару, которая является основным источником питьевого и хозяйственного водоснабжения для проживающих на побережье людей, связано с поступлением в её экосистему сточных вод Усольской промышленной зоны. Особенности техногенных потоков рассеяния рассмотрены на основе изучения концентраций 21 микроэлемента в сточных водах и водах р. Ангары на разном удалении от техногенных источников. Результаты исследований показали, что сточные воды содержат высокие концентрации микроэлементов, большинство из которых благодаря интенсивному разбавлению значительно уменьшаются в р. Ангаре. Исключение составляют Li, As, V, Mo, B, Br, Ge, Hg, концентрации которых остаются выше условно фоновых значений в 5 км ниже от источников загрязнения и могут представлять потенциальный риск для водной флоры и фауны реки.

Ключевые слова: р. Ангара, сточные воды, загрязнение, миграция техногенных микроэлементов.

Technogenic impact of wastewater on the hydrochemical composition of the Angara River

© 2022. V. I. Poletaeva ORCID: 0000-0002-3139-5864, M. V. Pastukhov ORCID: 0000-0003-1078-7145,
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1A, Favorskogo St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: alieva@igc.irk.ru

The Angara River is a source of drinking water supply for the population of Irkutsk Oblast (Russia). The ecosystem of the river has been under anthropogenic impact from the large Usolie-Sibirsky industrial zone for several decades. The aim of the present study was to analyze the concentrations of trace elements in the wastewater entering the Angara River and to determine their impact on the river's hydrochemical composition. For this purpose, concentrations of 21 trace elements were measured in the wastewater and waters of Angara River at different distances from the technogenic sources. The results obtained show that wastewater contains high concentrations of a large range of trace elements. The intensity of anthropogenic impact was determined using a contamination factor (CF), which allowed to identify four groups of trace elements depending on their concentration exceeding the background level. The largest factors are determined for Sb (CF up to 123), B (CF up to 345), Ti (CF up to 651), Br (CF up to 913), Ge (CF up to 1093), Hg (CF up to 1991). The inflow of elements of anthropogenic origin is reflected in a negative change in the hydro-chemical composition of the Angara River at sites where waste- and river water are mixed. However, due to intensive dilution of wastewater by the Angara River, concentration of most trace elements in the river water at a distance of 5 km downstream of contamination sources are reduced to background levels. At the same time, elements (Li, As, V, Mo, B, Br, Ge, Hg) have been identified, whose concentrations in the water of the Angara River in this section remain above the background values. Increased concentrations of the observed trace elements can lead to negative consequences for hydrobionts, which are vulnerable even to minor changes in the chemical composition of the Angara River.

Keywords: Angara River, wastewater, pollution, migration of technogenic microelements.

В настоящее время значительное воздействие на водные экосистемы оказывают потенциально токсичные микроэлементы, поступающие в водные объекты со сточными водами городских и промышленных агломераций. Увеличение концентраций микроэлементов в водных объектах, в первую очередь, ухудшает

качество природных вод [1–3]. Изменение гидрохимического состава водной экосистемы и накопление микроэлементов в пищевых цепях в процессе биомагнификации оказывают негативное влияние на гидробионтов [4, 5].

Река Ангара – единственный поверхностный сток оз. Байкал, является основным

источником питьевого водоснабжения проживающего на её побережье населения Иркутской области. Вода истока реки, так же как и оз. Байкал, относится к наиболее чистым водам мира [6]. В то же время поступающие в р. Ангару промышленные стоки и продукты хозяйственной деятельности прибрежных городов изменяют её гидрохимический состав. Наиболее значимый вклад в техногенную эмиссию химических элементов в экосистему р. Ангары вносят сточные воды Усольской промышленной зоны (УПЗ), включающей предприятия химической, фармацевтической и соледобывающей промышленности, машиностроительный завод и ТЭЦ. Ранее определено, что производственные сточные воды УПЗ содержат значительные количества ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ [7]. Особая опасность для экосистемы реки связана с поступлением техногенной ртуты от закрытого в настоящее время предприятия «Усольехимпром», производившего хлор и каустическую соду методом ртутного электролиза [8, 9]. Несмотря на значительную степень загрязнения окружающей среды в районе УПЗ, микроэлементный состав её сточных вод (за исключением Hg) не изучен, хотя любые производственные процессы предопределяют поступление в окружающую среду различных техногенных веществ. В связи с этим, целью работы стало изучение содержания ряда микроэлементов в сточных водах УПЗ и определение их влияния на гидрохимический состав воды р. Ангары.

Особую актуальность исследованиям придаёт возможность использования полученных результатов для экологического мониторинга при проведении запланированных Правительством Российской Федерации работ по обезвреживанию и ликвидации высокозагрязнённых производственных объектов предприятия «Усольехимпром», в результате которых повышается риск поступления элементов техногенного происхождения в экосистему р. Ангары.

Материалы и методы исследования

Исследуемый участок р. Ангары (рис.) входит в Байкальскую природную территорию, которая выделена в целях сохранения и предотвращения негативных воздействий хозяйственной деятельности на уникальную экологическую систему оз. Байкал. В период исследований в р. Ангару поступали сточные воды из канавы гидрозолоудаления (ГЗУ), выводящей воды ТЭЦ и других предприятий

г. Усолье-Сибирское, и дренажной канавы (ДК) – организованного промышленно-ливневого выпуска производственных объектов г. Усолье-Сибирское. Сточные воды ГЗУ и ДК являются также приёмниками поверхностного стока с территории предприятия «Усольехимпром». Сточные воды третьего источника загрязнения являются непосредственным выпуском предприятия (ВП) «Усольехимпром».

Для определения химического состава и протяжённости потоков рассеяния техногенных химических элементов отобраны пробы сточных вод УПЗ и вод р. Ангары в 50 м, 1,5 км и 5 км ниже по течению от источников загрязнения (рис.). Для оценки воздействия сточных вод отобраны пробы воды из р. Ангары в условно фоновой точке в районе пос. Железнодорожный, который расположен в 8 км выше по течению от источников загрязнения (рис.).

Химический анализ проб воды осуществлён в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН (г. Иркутск, Россия). Определение в воде Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Br, Mo, Cd, Sb, Pb выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT-2. Определение концентраций Hg в воде проводили на атомно-абсорбционном анализаторе РА-915⁺ с приставкой РП-91 методом «холодного пара». Точность анализа регулярно проверяли с использованием сертифицированных стандартов (ICP Multi Element Standard Solution-Sol X CertiPUR for Surface Water Testing (Германия), Combined Quality Control Standart IQC-026 (США), ГСО 8004-93 (Россия)). Измерения содержания элементов проводили с погрешностью не более 10%, за исключением Al, Mn и Ge (11%, 16% и 23% соответственно). Статистическую обработку данных проводили с помощью программного пакета Microsoft Excel 2007.

Интенсивность загрязнения воды оценивали по коэффициенту загрязнения (CF):

$$CF = C_i / C_f,$$

где C_i – тестируемая концентрация химического элемента, C_f – концентрация химического элемента в воде фонового участка.

Результаты и обсуждение

Концентрации микроэлементов в воде условно фонового участка значительно ниже предельно допустимых концентраций (ПДК),

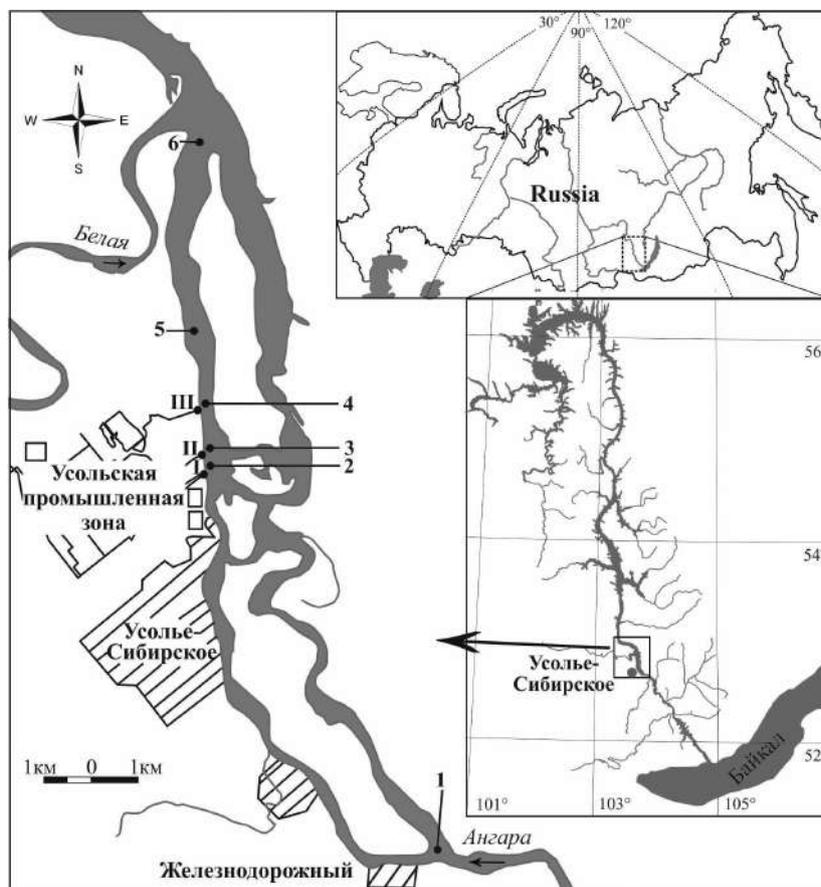


Рис. Карта-схема станций отбора проб воды в районе влияния Усольской промышленной зоны: I – ГЗУ; II – ВП; III – ДК; 1 – р. Ангара (фоновая станция); 2 – 50 м ниже ГЗУ; 3 – 50 м ниже ВП; 4 – 50 м ниже дренажной канавы; 5 – р. Ангара (1,5 км ниже выпусков); 6 – р. Ангара (5 км ниже выпусков)
Fig. Map-scheme of water sampling stations in the area of influence of the Usolie industrial zone: I – hydro-ash removal (HAR); II – drainage effluent (DE); III – drainage ditch (DD); 1 – Angara River (background station); 2 – 50 m down HAR; 3 – 50 m down DE; 4 – 50 m down the DD; 5 – Angara River (1.5 km down discharge); 6 – Angara River (5 km down discharge sites)

регламентированных для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ГН 2.1.5.1315-03) и близки к концентрациям в воде истока р. Ангары (табл. 1).

По величине *CF* микроэлементы в сточных водах разделены на четыре группы (табл. 2). Близкие концентрации большинства микроэлементов в сточных водах ВП и ДК (табл. 1) и единый спектр поступающих в повышенных концентрациях в р. Ангару микроэлементов (табл. 2) свидетельствуют о том, что основным источником их поступления является предприятие «Усольехимпром». Характерной особенностью сточных вод ДК является дренирование ими ртутьсодержащих отходов шламохранилища предприятия, приводящее к увеличению в воде тонкодисперсной фракции шлама и насыщению вод Hg, As и Mn. Наибольший вклад в техногенное поступление потенциально токсичных элементов вносят

сточные воды ГЗУ (табл. 1). По данным [10], основным топливом ТЭЦ г. Усолье-Сибирское является бурый уголь Азейского месторождения Иркутского угольного бассейна, зола которого обогащена большим количеством элементов-примесей, в том числе Cr, Co, Zn, As, Sb.

По данным ежемесячного мониторинга воды в период работы предприятия «Усольехимпром» в 2006–2008 гг. концентрация ртути в ГЗУ достигала 9,0 мкг/л, ДК – 2,5 мкг/л, ВП – 8,1 мкг/л [11]. Во время наших исследований концентрация токсиканта в сточных водах уменьшилась, составляя от 4,8 ПДК в воде ГЗУ до 4 ПДК в воде ДК (табл. 1). Такие результаты показывают, что закрытие предприятия не решило проблему эмиссии поллютантов в окружающую среду. Неконтролируемое поступление элементов техногенного происхождения после закрытия предприятия продолжается с поверхностным стоком (атмо-

Таблица 1 / Table 1

Микроэлементный состав сточных вод и вод р. Ангары (мкг/л) в районе Усольской промышленной зоны
Trace element composition of wastewater and Angara River water (µg/L) around Usolie-Sibirskoye industrial zone

Станции отбора Sampling site	Li	B	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Br	Mo	Cd	Sb	Pb	Hg
1*	4,3	4	14	0,15	0,29	0,19	4,2	17	0,033	0,52	0,93	1,19	0,008	0,005	0,18	5	0,72	0,012	0,026	0,025	0,0012
ГЗУ / HAR	51,0	1435	587	98,89	4,77	5,47	198,5	204	2,090	33,02	3,84	16,36	0,403	4,867	1,47	4486	6,96	0,497	3,194	1,209	2,395
2	8,3	167	107	4,39	0,97	0,74	23,7	33	0,236	3,94	1,03	5,44	0,060	0,659	0,38	523	2,01	0,066	0,278	0,188	0,239
ВП / DE	25,6	128	266	27,10	1,02	11,07	1,2	60	0,142	0,53	0,44	10,74	0,178	0,395	0,61	2059	1,46	0,031	1,202	0,308	0,399
3	3,1	25	13	0,07	0,45	0,28	3,5	8	0,039	0,67	0,46	0,48	0,018	0,071	0,29	97	1,26	0,013	0,041	0,015	0,016
ДК / DT	16,3	102	168	24,49	1,31	6,17	23,3	28	0,289	0,76	0,29	1,24	0,173	0,294	2,14	1562	1,60	0,029	1,202	0,171	1,990
4	3,7	23	12	0,01	0,47	0,55	4,4	3	0,031	0,43	0,39	0,15	0,028	0,090	0,25	171	1,29	0,010	0,044	0,008	0,204
5	2,6	20	13	0,13	0,44	0,21	3,8	9	0,028	0,42	0,43	0,34	0,012	0,031	0,38	58	1,25	0,009	0,038	0,017	0,008
6	2,2	11	11	0,15	0,40	0,13	4,9	10	0,025	0,42	0,44	0,20	0,007	0,017	0,33	19	1,07	0,008	0,032	0,020	0,003
Источник р. Ангары** Angara River source	4,8	6	4	0,30	0,39	0,12	2,9	19	0,011	0,25	0,62	2,11	0,003	0,028	0,46	-	1,37	0,030	0,042	0,050	0,0010
ПДК*** MPC	30	500	200	100	100	50	100	300	100	20	-	1000	-	-	10	200	-	1	5	10	0,5

Примечание: прочерк обозначает отсутствие данных; * – номера станций соответствуют станциям отбора проб на рисунке; ** – [6]; ПДК – предельно-допустимая концентрация.

Note: a strikethrough means absence of the data; * – numbers of stations designate sampling stations in Figure; ** – [6]; MPC – maximum permissible concentrations.

Таблица 2 / Table 2

Спектры микроэлементов в сточных водах УПЗ, объединённые по коэффициенту загрязнения (CF)
Trace element spectra in wastewater of Usolie-Sibirskoye industrial zone united according to pollution index (CF)

Группа Group	ГЗУ HAR	ВП DE	ДК DT
I (CF от 0 до 20)	Fe, Cu, Zn, As, Mo	Li, Al, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb	Li, Al, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb
II (CF от 21 до 99)	Li, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, Cd, Pb	B, Cr, Ga, Ge, Sb	B, Cr, Ga, Ge, Sb
III (CF от 99 до 200)	Sb	Ti	Ti
IV (CF от 201 до 2000)	Ti, Br, B, Hg, Ge	Br, Hg	Br, Hg

сферные осадки, талые воды, поверхностный смыв) с высокозагрязнённой промплощадки «Усольехимпром».

В 50 м ниже выпусков, в первую очередь, за счёт разбавления и интенсивного перемешивания сточных вод большими объёмами воды р. Ангары значительно уменьшаются концентрации всех элементов техногенного происхождения (табл. 1). На участках смешения вод р. Ангары со сточными водами ГЗУ, ВП и ДК величина CF для Li, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Mo, Cd, Pb не превышает 8. При смешении речных и сточных вод величина CF более высокая для Sb (до 10,7), Ti (до 28,9), В (до 40,1), Br (до 106,5), Ge (до 148,0), Hg (до 199,2).

На участках, расположенных в 1,5 и 5 км ниже поступления сточных вод, концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Cd, Pb в воде р. Ангары снижаются до фоновых концентраций (табл. 1). В 5 км ниже выпусков большое влияние на концентрацию элементов оказывает дополнительное разбавление загрязнённых вод водами второго рукава р. Ангары (рис.). Наибольшая миграционная способность характерна для Li, As, V и Mo (табл. 1). В работе [12] определено, что на водную миграцию V и Mo большое влияние оказывает рН среды, их относительная подвижность очень высокая в околонейтральной водной среде р. Ангары. As, V и Mo – элементы с сильновыраженными анионогенными свойствами [13]. В работе [14] эти элементы в воде притока оз. Байкал р. Селенге были выделены в общую мобильную группу элементов [14]. Миграция этих элементов в кислородсодержащих околонейтральных водах, вероятнее всего, осуществляется в виде продуктов диссоциации кислот рассматриваемых элементов в высшей степени их окисления (например, H_3AsO_4 , HVO_3 , H_2MoO_4) [13].

В 5 км ниже выпусков сточных вод УПЗ концентрация Sb и Ti близки к фоновым (табл. 1). Концентрации В, Ge, Br и Hg последовательно снижаются вниз по течению реки, но даже через 5 км остаются выше фоновых концентраций. Результаты исследований основного ионного состава [7] показывают, что концентрации HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} в воде р. Ангары в 1,5 км ниже по течению от выпусков близки к фоновым значениям, концентрации Cl^- и Na^+ в 1,5 и 5 км ниже выпусков превышают фоновые значения в десятки раз. Миграционные характеристики В, Ge и Br могут быть объяснены двумя факторами: высоким содержанием элементов в хлоридно-натриевых рассолах, используемых в производстве,

и высокой степенью подвижности элементов в водах р. Ангары.

Из элементов, концентрации которых даже после разбавления остаются повышенными, наиболее опасными загрязнителями водной среды являются Hg и As. Повышенные концентрации Hg определяются способностью токсиканта переноситься на большие расстояния [15]. Изучение негативного воздействия предприятия «Усольехимпром» показало накопление Hg во всех абиотических и биотических компонентах р. Ангары [9, 11]. Миграционные потоки As, также как Ge, В и Br в экосистеме р. Ангары не изучены. Несмотря на то, что токсичность Ge, В и Br ниже, чем Hg и As, повышение концентраций этих элементов может привести к негативным последствиям для гидробионтов. В большей степени это относится к эндемичным видам оз. Байкал, обитающим в верхней части р. Ангары и являющимся наиболее чувствительными даже к незначительному изменению химического состава вод.

Заключение

В результате проведённых гидрохимических исследований установлено, что со сточными водами УПЗ в р. Ангару поступают значительные количества разных микроэлементов, особенно Sb, Ti, В, Br, Ge, Hg. Высокие концентрации Hg в сточных водах в период остановки предприятия «Усольехимпром» указывают на значительное загрязнение грунтов промплощадки. Поступление в р. Ангару не только ртути, но и других накопленных за время работы предприятия микроэлементов, может привести к необратимым негативным последствиям для экосистемы реки. В связи с этим, планируемые работы по ликвидации экологического ущерба от деятельности предприятия должны проводиться с повышенными мерами предосторожности.

Функционирование крупного промышленного комплекса на побережье пресноводной р. Ангары приводит к изменению её гидрохимического состава. Несмотря на то, что результаты исследований показывают значительное уменьшение концентраций элементов техногенного происхождения в воде в 1,5 и 5 км ниже сброса сточных вод, многолетнее поступление этих элементов предопределяет их накопление в экосистеме реки. В связи с тем необходимы более детальные исследования миграционных особенностей токсичных элементов, направленные на изучение их сорбции и переноса на

взвешенных частицах, закрепления в донных отложениях и биоаккумуляции гидробионтами.

Исследование проведено в рамках государственного задания по проекту № 0284-2021-0003.

References

1. Chappells H., Parker L., Fernandez C., Conrad C., Drage J., O'Toole G., Campbell N., Dummer T.J.B. Arsenic in private drinking water wells: an assessment of jurisdictional regulations and guidelines for risk remediation in North America // *Journal of Water and Health*. 2014. V. 12. No. 3. P. 372–392. doi: 10.2166/wh.2014.054
2. Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B., Slipenchuk M.V., Cymbal M.N. Environmental situation in the central part of the Kola Peninsula // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 64–70 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-064-070
3. Gul N., Shah M.T., Khan S., Khattak N.U., Muhammad S. Arsenic and heavy metals contamination, risk assessment and their source in drinking water of the Mardan District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan // *Journal of Water and Health*. 2015. V. 13. No. 4. P. 1073–1084. doi: 10.2166/wh.2015.011
4. Onger D.M.K., Lalah J.O., Wandiga S.O., Schramm K.-W., Michalke B. Seasonal variability in cadmium, lead, copper, zinc and iron concentrations in the three major fish species, *Oreochromis niloticus*, *Lates niloticus* and *Rastrineobola argentea* in Winam Gulf, Lake Victoria: Impact of wash-off into the lake // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2012. V. 88. P. 166–171. doi: 10.1007/s00128-011-0472-z
5. Ciesielski T.M., Pastukhov M.V., Leeves S.A., Farkas J., Lierhagen S., Poletaeva V.I., Jenssen B.M. Differential bioaccumulation of potentially toxic elements in benthic and pelagic food chains in Lake Baikal // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. P. 15593–15604. doi: 10.1007/s11356-016-6634-0
6. Alieva V.I., Grebenshikova V.I., Zagorulko N.A. Long-term monitoring and modern methods of study of microelement composition of Angara River waters // *Inzhenernaya ekologiya*. 2011. No. 3. P. 24–34 (in Russian).
7. Alieva V.I., Pastukhov M.V. Hydrochemical characteristics of the Angara River in the influence area of the Usolie industrial center // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2012. No. 1. P. 68–73 (in Russian).
8. Perrot V., Epov V.N., Pastukhov M.V., Grebenshikova V.I., Zouiten C., Sonke J.E., Husted S., Donard O.F.X., Amouroux D. Tracing sources and bioaccumulation of mercury in fish of Lake Baikal – Angara River using Hg isotopic composition // *Environmental Science & Technology*. 2010. V. 44. No. 21. P. 8030–8037. doi: 10.1021/es101898e
9. Pastukhov M.V., Poletaeva V.I., Tirsikh E.N. Long-term dynamics of mercury pollution of the Bratsk reservoir bottom sediments, Baikal region, Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 321. Article No. 012041. doi: 10.1088/1755-1315/321/1/012041
10. Ilenok S., Arbusov S. Metalliferous coals of the Azeyskoe deposit of Irkutsk coal basin // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. V. 329. No. 8. P. 132–144.
11. Alieva V.I., Butakov E.V., Pastukhov M.V., Andruaitis L.D. Characteristics of anthropogenic contamination and mercury transformation forms in Bratsk Reservoir // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2011. No. 5. P. 431–438 (in Russian).
12. Brooks R.R. *Pollution through trace elements* // *Environmental chemistry* / Ed. J. Bockris. New York: Plenum Press, 1978. P. 429–476.
13. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Landscape Geochemistry*. Moskva: Astreya-2000, 1999. 768 p. (in Russian).
14. Lychagin M., Chalov S., Kasimov N., Shinkareva G., Jarsjö J., Thorslund J. Surface water pathways and fluxes of metals under changing environmental conditions and human interventions in the Selenga River system // *Environmental Earth Sciences*. 2017. V. 76. No. 1. P. 1–14. doi: 10.1007/s12665-016-6304-z
15. Jewett S.C., Zhang X., Naidu A.S., Kelley J.J., Dasher D., Duffy L.K. Comparison of mercury and methylmercury in northern pike and Arctic grayling from western Alaska rivers // *Chemosphere*. 2003. V. 50. No. 3. P. 383–392. doi: 10.1016/s0045-6535(02)00421-6

Сезонная динамика химического состава поверхностной воды р. Оби

© 2022. А. Н. Эйрих, к. т. н., н. с., Т. Г. Серых, вед. инженер,
Е. А. Овчаренко, вед. инженер, Д. П. Подчуфарова, вед. инженер,
А. В. Котовщиков, к. б. н., с. н. с.,
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук,
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодёжная, д. 1,
e-mail: alnik@iwep.ru

Представлены результаты исследования химического состава (главные ионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- ; биогенные элементы: N, P, Si; микроэлементы: Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn) поверхностной воды реки Оби в районе г. Барнаула в различные гидрологические периоды 2018 г. С помощью факторного анализа выделены три основные группы элементов, отличающиеся по содержанию и распределению их в воде р. Оби. Установлено, что динамика химического состава поверхностной воды р. Оби в период с марта по сентябрь связана с изменением водного режима реки. В зимний период с уменьшением водного стока происходит увеличение содержания ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , биогенных элементов (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), химического потребления кислорода (ХПК) и содержания элементов первой группы (Li, B, Ti, Mn, Cu, Rb, Sr, Ba). В период весеннего половодья с максимальным увеличением водного стока повышается концентрация элементов второй группы (Be, Al, V, Pb, Fe). Оценка уровня загрязнения воды р. Оби относительно предельно допустимых концентраций для вод рыбохозяйственного назначения показала, что превышение содержания органического вещества (по ХПК) составляло до 3,0 раз, для Al – до 6,8 раза, для Ti – до 2,7 раза, для Mn – до 4,6 раза, для Fe – до 2,4 раза в зимнюю межень и весеннее половодье, а для Cu – до 3,7 раз во все гидрологические периоды.

Ключевые слова: река Обь, поверхностная вода, гидрохимические характеристики, биогенные элементы, микроэлементы.

Chemical composition of the surface water in the Ob River

© 2022. A. N. Eirikh ORCID: 0000-0003-3033-2172, T. G. Serykh ORCID: 0000-0003-3392-9126,
E. A. Ovcharenko ORCID: 0000-0003-0865-1089, D. P. Podchufarova ORCID: 0000-0003-3275-1477,
A. V. Kotovschikov ORCID: 0000-0001-8427-3329
Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia, 656038,
e-mail: alnik@iwep.ru

The Ob River is a multifunctional water body used for fishery purposes, shipping, irrigation, recreation and drinking water supply. The research on the river water quality related to the assessment of ecological state and studying the regularities of chemical composition dynamics is topical nowadays. The paper presents the results of investigation of the hydrochemical composition (major ions: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , nutrients: N, P, Si and trace elements: Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn) of the Ob River water near the city of Barnaul. The study was performed by Chemical-Analytical Center, Institute for Water and Environmental Problems of Siberian Branch RAS. The content of ions PO_4^{3-} , Si, and COD (chemical oxygen consumption) was determined using a DR-2800 Hach Lange spectrophotometer, while the mineral composition, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- ions – with a Dionex ICS-3000 ion chromatograph. The concentration of trace elements was measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS) on an ICAP-Qc spectrometer. The dynamics of elements content in the Ob water was determined in different hydrological seasons of 2018. The river water is enriched by major ions and nutrients due to increased runoff of more mineralized groundwater in winter. Based on the factor analysis, we revealed three main groups of components, which differ in content and spatial distribution within the Ob surface water. In addition, we made the assessment of water pollution and revealed the excess of MAC for fishing waters in organic matter content (COD), Al, Ti, Cu, Fe and Mn.

Keywords: the Ob River, surface water, hydrochemical characteristics, biogenic elements, trace elements.

Мониторинг качества речных вод в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и в районах крупных промышленных центров представляет собой важную и актуальную задачу, связанную как с оценкой экологического состояния водных объектов, так и с изучением природных закономерностей динамики химического состава поверхностных вод. На формирование химического состава речных вод существенное влияние оказывают поверхностные, почвенные и подземные воды, поступающие с водосборной площади. В результате происходят изменения минерального состава, содержания органических веществ и биогенных элементов [1–3]. Промышленные предприятия, коммунальные хозяйства городов и других населённых пунктов используют речные воды не только для водопотребления, но и для водоотведения [4]. Поэтому экологические изменения водных объектов, связанные с разнообразием природных условий водосборного бассейна в сочетании с техногенным воздействием, определяют уровни содержания и пространственные различия распределения загрязняющих веществ (ЗВ) в речных водах [4–7].

Наиболее опасными среди потока ЗВ, поступающих в природные воды, являются микроэлементы (В, Al, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Pb, Fe, Mn). Они относятся к стойким ЗВ, не разлагаются в природных водах, а лишь меняют формы своего сосуществования и способны мигрировать на значительные расстояния [8]. Являясь непременными компонентами поверхностных вод суши, микроэлементы значительным образом влияют на качество водной среды и функционирование водных экосистем [9, 10].

В то же время многие из них играют важную роль в метаболических процессах живых организмов. Например, такие металлы, как Mn, Cu, Co, Ni, V, Fe, Zn, Mo входят в состав ферментов, некоторых белков, витаминов, гормонов. Эти металлы принимают участие в биологических функциях организмов таких как транспорт кислорода, связывание свободных радикалов; тем самым обеспечивая их нормальную жизнедеятельность. Однако поступление из внешней среды избыточных количеств этих элементов приводит к различным токсическим эффектам. Высокотоксичными являются ксенобиотики, т. е. элементы, не входящие в состав биомолекул (например, Cd и Pb) [11–13].

Целью нашего исследования являлось изучение закономерностей сезонной дина-

мики концентраций элементов (главные ионы, биогенные элементы, микроэлементы) в поверхностной воде Верхней Оби для оценки природных и антропогенных факторов, влияющих на её химический состав.

Материалы и методы исследования

Река Обь по площади водосбора занимает первое место среди рек России, образуется при слиянии рек Бии и Катунь, бассейны которых расположены в пределах Горного Алтая, и впадает в Обскую губу Карского моря [12]. Длина участка р. Оби в районе Барнаула – более 60 км. На левом берегу реки находится городская территория, на правом – природная зона. Река Обь и её притоки являются водными объектами рыбохозяйственного назначения. Одновременно водные ресурсы р. Оби используют для судоходства, ирригации, рекреации и хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Водный режим р. Оби формируется за счёт ледникового и снегового питания, грунтовых вод и осадков. Преобладание тех или иных составляющих обуславливает водность реки в течение года. Скоростной режим реки очень разнообразен и подвержен изменениям в зависимости от сезона, водности и конкретного створа [14].

Для получения достоверной и надёжной информации о содержании ЗВ в изучаемом природном объекте пробоотбор должен осуществляться так, чтобы анализируемые образцы были «репрезентативными» (представительными). Поэтому для изучения сезонного изменения химического состава (главные ионы, биогенные элементы, микроэлементы) поверхностной воды в створе такой крупной реки, как Обь в районе г. Барнаула проводили отбор проб в трёх пунктах (у берегов и в центре русла) из поверхностного слоя воды (60 см от поверхности). Пробы воды отбирали стеклянным батометром в пластиковые бутылки, затем отобранные пробы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм для определения растворённых форм элементов в соответствии с ГОСТ Р 51592-2000. Отбор проб воды осуществляли в период с марта по сентябрь 2018 г. с периодичностью два раза в месяц. Карта-схема расположения пунктов отбора проб воды представлена на рисунке.

Аналитические работы по определению гидрохимических показателей минерального состава (общая жёсткость, ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^-), биогенных элементов (N, P, Si) и микроэлементов (Li, Be, B, Al,

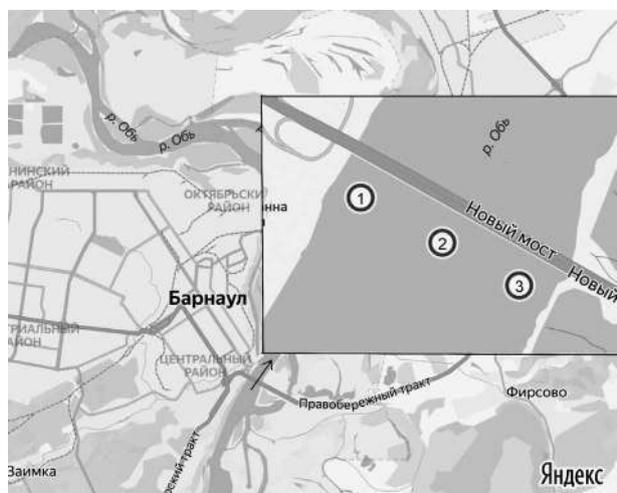


Рис. Карта-схема расположения пунктов отбора проб поверхностной воды на р. Оби в районе г. Барнаула, 2018 г.: 1 – левый берег, 2 – середина, 3 – правый берег

Fig. A schematic map of points for surface water sampling from the Ob river near the city of Barnaul in 2018: 1 – left bank, 2 – middle, 3 – right bank

Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, Fe, Mn) в пробах воды р. Оби выполняли в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН по методикам, допущенным для целей государственного экологического контроля (РД 52.24.403-2018; М 002-2016; ПНД Ф 14.1:2:4.132-98; ПНД Ф 14.1:2:4.248-07; ГОСТ

Р 56219-2014). Содержание PO_4^{3-} , Si и химическое потребление кислорода (ХПК) определяли с помощью спектрофотометра DR-2800 Nach Lange, минеральный состав и ионы NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- – на ионном хроматографе Dionex ICS-3000. Содержание микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) на приборе ICAP-Qc. Статистическую обработку результатов проводили с использованием Microsoft Excel 2010. Погрешности определения соответствуют значениям, указанным в нормативных документах.

Результаты и обсуждение

По классификации О.А. Алекина вода р. Оби относится к гидрокарбонатному классу группы кальция. Общая минерализация воды изменяется от 92 в половодье до 261 мг/дм³ в зимнюю межень [15].

Проведённый химический анализ состава поверхностной воды р. Оби в районе г. Барнаула показал, что концентрация элементов варьирует в широких пределах. В таблице 1 представлены средние, минимальные и максимальные значения концентраций гидрохимических показателей в воде р. Оби и средние концентрации, рассчитанные для незагрязнённых рек мира [16]. В таблице 2 приведены

Таблица 1 / Table 1

Средние, минимальные и максимальные значения гидрохимических показателей в воде р. Оби в районе г. Барнаула в 2018 г. / Average, minimum and maximum values of hydrochemical characteristics in the Ob water near Barnaul in 2018

Показатели Characteristics	Среднее Average <i>n</i> = 42	Min	Max	ПДК _{р.х.} Maximum allowable concentration (MAC)	Реки мира World rivers [17]
ХПК, мгО/л Chemical oxygen demand, mgO/L	25	2	87	30	–
Жёсткость, мг-экв./л Hardness, mEq/L	1,9	1,2	2,8	–	–
Ca ²⁺	27,1	18,2	41	–	–
Mg ²⁺	5,9	3,1	9,5	40	–
Na ⁺	5,9	2,6	9,4	120	–
K ⁺	1,4	0,7	3,8	50	–
SO ₄ ²⁻	14,0	7,0	20,0	–	–
Cl ⁻	2,9	1,0	6,0	–	–
NH ₄ ⁺	0,18	0,01	0,45	0,5 (по NH ₄ ⁺)	0,015
NO ₂ ⁻	0,013	0,001	0,035	0,08	0,001
NO ₃ ⁻	1,60	0,26	3,5	40	0,10
PO ₄ ³⁻	0,07	0,01	0,29	0,15 (по PO ₄ ³⁻)	0,01
Si	3,0	2,1	5,4	10	4,85

Примечание: концентрация ионов и Si приведены в мг/л, «–» – данные отсутствуют.
Note: the content of ions and Si in mg/L, “–” – no data.

Таблица 2 / Table 2

Средние, минимальные и максимальные значения концентраций микроэлементов в воде р. Оби в районе г. Барнаула в 2018 г., мкг/л / Average, minimum and maximum concentrations of trace elements in the Ob water near Barnaul in 2018, µg/L

Показатели Characteristics	Среднее Average n = 42	Min	Max	ПДК _{р.х.} MAC	Кларк речных вод River water clark [18]	Реки мира World rivers [17]
Li	1,4	0,3	2,6	80	2,5	1,8
Be	0,004	0,001	0,033	0,3	0,2	–
B	12,6	3,57	27,1	500	–	10
Al	43,4	1,0	272	40	400	32
Ti	75,4	0,9	163	60	–	–
V	0,73	0,08	1,44	1,0	0,9	–
Cr	0,57	0,15	2,13	20	1	–
Mn	9,3	1,27	45,9	10	7	34
Co	0,24	0,02	1,04	10	0,2	0,2
Ni	1,72	0,11	3,15	10	0,3	0,8
Cu	1,68	0,2	3,7	1	7	1,5
Zn	4,31	0,97	14,0	10	20	0,6
As	0,74	0,09	1,42	50	2,0	0,6
Rb	0,51	0,08	0,89	100	1	–
Sr	82,3	33,1	186	400	50	60
Mo	0,54	0,19	0,75	1	1	0,4
Cd	0,053	0,01	0,20	5	0,1	–
Ba	18,7	10,6	66,4	740	10	23
Pb	0,14	0,01	0,60	6	3	0,1
Bi	0,007	0,001	0,072	–	0,1	–
Fe	63,7	3,4	246	100	67	66

Примечание: «–» – данные отсутствуют.

Note: “–” – no data.

средние значения и вариации концентраций микроэлементов в воде р. Оби, средние значения содержания элементов в реках мира [17] и кларк речных вод [18].

Необходимо отметить, что исследования проходили в различные гидрологические периоды – с марта по сентябрь. В отличие от водотоков, расположенных в регионах тёплого и умеренного климата, сибирские реки и водоёмы в течение длительного зимнего периода имеют устойчивый ледовый покров (до середины апреля), что влечёт за собой сезонные изменения в процессах круговорота и обмена веществ в системе вода – донные отложения [19]. Поэтому на формирование химического состава речной воды Оби наряду с влиянием поверхностных, почвенных и подземных вод водосборного бассейна, существенное влияние оказывают внутриводоёмные процессы.

В период с марта по сентябрь 2018 г. на изучаемом участке р. Оби отмечается изменение химического состава поверхностной воды по минеральному составу, а именно, на-

блюдается снижение общей жёсткости с 2,8 до 1,2 мг-экв./л и, соответственно, уменьшение содержания Ca^{2+} с 41 до 18,2 мг/л и Mg^{2+} с 9,5 до 3,1 мг/л. Снижение содержания катионов Na^+ с 9,4 до 2,6 мг/л и катионов K^+ с 3,8 до 0,7 мг/л, а также понижение концентрации анионов SO_4^{2-} с 20,0 до 7,0 мг/л и Cl^- с 6,0 до 1,0 мг/л отмечено в период с конца зимней межени до начала летне-осенней межени.

Содержание трудно окисляемого органического вещества, определяемого по ХПК и характеризующего общую концентрацию органического вещества в воде, для р. Оби варьирует от 2,0 до 87,0 мгО/л. Выявлены превышения гигиенических нормативов ХПК до 3 раз в зимнюю межень, что, вероятно, обусловлено началом массового развития подо льдом реки биоты и высоким содержанием веществ гумусового происхождения.

Содержание ионов NH_4^+ варьирует от 0,01 до 0,45 мг/л, NO_2^- – 0,001 до 0,035 мг/л, NO_3^- – 0,26 до 3,5 мг/л, их максимальные концентрации в воде р. Оби отмечены в

зимнюю межень. В этот период происходит уменьшение их потребления фитопланктоном и денитрифицирующими бактериями, а также процессы распада накопившегося за лето органического вещества и перехода азота из органических форм в минеральные. Кроме того, в зимнюю межень ионы NO_3^- могут дополнительно поступать с грунтовыми водами, поскольку они являются одним из основных источников питания реки в этот период. Сезонная динамика ионов NO_2^- и NO_3^- характеризуется минимальными концентрациями в период летне-осенней межени, что связано с ассимиляцией их водными автотрофами, в большей степени фитопланктоном.

Для ионов PO_4^{3-} наблюдается аналогичное распределение с увеличением его концентрации в зимнюю межень до 3,7 раз относительно летне-осенней межени (табл. 1).

Сезонные изменения концентраций ионов аммония, нитратов и фосфатов в воде р. Оби в 2018 г. сопоставимы с их содержанием в исследуемый период 2012–2015 гг.: 0,01–0,43 мг/л, 0,1–4 мг/л и 0,01–0,20 мг/л соответственно [15].

Содержание Si в поверхностной воде р. Оби характеризуются увеличением концентрации в весенний период. Можно предположить, что его поступление связано с выносом с водосборной площади во время снеготаяния.

Для оценки возможности сопряжённого поступления элементов, имеющих повышенные и максимальные значения концентраций, была построена матрица их корреляционных зависимостей. Содержание микроэлементов Li, Al, Be, V, Mn, Cr, Ni, Rb, As, Ba, Pb, Fe, Cu находится в высокой корреляционной зависимости с коэффициентами парной корреляции $R \geq 0,6$.

При оценке экологического состояния речных экосистем в различные гидрологические периоды всегда встаёт проблема многофакторности влияния физико-химических процессов на содержание микроэлементов в поверхностной воде. Поэтому проведение факторного анализа позволило сгруппировать исследуемые элементы в несколько отдельных групп. Первая группа (Li, B, Ti, Mn, Cu, Rb, Sr, Ba) – это элементы, максимальные концентрации которых определены в период зимней межени, когда их поступление происходит преимущественно с подземным грунтовым питанием и внутриводоемными процессами, связанными с изменением физико-химических условий. Концентрация элементов данной группы не превышала значений предельно

допустимых концентраций для вод рыбохозяйственного назначения ($\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$). Исключение составляют Mn, Cu, Ti, концентрация которых превышала значения $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$.

Концентрация растворённых форм Mn в поверхностной воде р. Оби в период зимней межени и начала весеннего половодья значительно выше, чем в остальные фазы водного режима и превышает значения $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$ до 4,6 раз. Значительное увеличение концентрации растворённых форм Mn в зимний период связано с сезонными особенностями распределения марганца в системе вода – донные отложения. В зимний подледный период в поровой воде донных отложений при недостатке кислорода устанавливаются восстановительные условия ($E_h = -100 \text{--} -240 \text{ mV}$), которые способствуют поступлению марганца (Mn^{2+}) из донных отложений в воду [19]. В то же время среднее значение концентраций (за исследуемый период) в поверхностной воде р. Оби для Mn составляет 9,3 мкг/л, что сопоставимо с кларком речных вод [18] (табл. 2).

Содержание Cu в воде р. Оби варьировало от 0,2 до 3,7 мкг/л, во все периоды наблюдения отмечено превышение значений $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$ до 3,7 раза. Среднее значение концентраций Cu составило 1,8 мкг/л, что соответствует среднемировому содержанию в речной воде (табл. 2).

В зимнюю межень и весеннее половодье установлено превышение $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$ для Ti до 2,7 раза.

Вторая группа (Be, Al, V, Zn, Pb, Fe) – это металлы, поступление которых происходит преимущественно в весеннее половодье. В этот период отмечены повышения концентрации элементов у правого и левого берегов, обусловленные поверхностным стоком веществ с водосборной площади в пределах городской территории. Ранее было показано, что в период половодья микроэлементы Al, Fe, Pb в воде р. Оби в основном транспортируются в составе взвешенного вещества [20] или мигрируют в структуре тонкодисперсных Fe-Al коллоидов, связанных с органическим веществом [5, 21]. Концентрация элементов второй группы в поверхностной воде на изучаемом участке р. Оби не превышала значений $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$. Исключение составляют Al и Fe, концентрация которых превышала $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$ в зимний и весенний периоды.

Среднее значение концентрации Al в поверхностной воде р. Оби в весеннее половодье составляет 103 мкг/л, в отдельных случаях достигая 6,8 $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$. В летне-осеннюю межень содержание Al было достаточно стабильно, за

исключением нескольких значений, где было зафиксировано превышение до 1,1 ПДК_{р.х.}, что может быть связано с его поступлением с водосборной площади во время осенних паводков.

Среднее значение концентрации Fe в поверхностной воде р. Оби хорошо сопоставимо со средним его содержанием в реках мира и кларком в речных водах (табл. 2) и составляет 67,8 мкг/л. В реках максимальные концентрации Fe и Mn, превышающие уровни ПДК, наблюдаются в весенний период. Железо и марганец поступают в реки с поверхностным стоком, где высвобождаются при деструкции органического вещества и находятся в устойчивой форме подвижных ионов – Fe²⁺, Mn²⁺ [22, 23]. В р. Оби в весеннее половодье и летне-осеннюю межень в некоторых случаях определено превышение содержания Fe до 2,4 ПДК_{р.х.}.

В третью факторную группу выделены Ni и Cd, их концентрации в поверхностной воде р. Оби в исследуемый период изменялись в диапазоне от 0,11 до 3,15 мкг/л и от 0,01 до 0,34 мкг/л соответственно. Увеличение их концентраций, не превышающие ПДК_{р.х.}, отмечены в зимний и весенний периоды (табл. 2).

Таким образом, динамика химического состава поверхностной воды р. Оби зависит от сезонных климатических изменений. Водный режим на изучаемом участке р. Оби в период с марта по сентябрь 2018 г. меняется от минимального (399 м³/с) в зимнюю межень до максимального (4640 м³/с) в весеннее половодье, в летне-осеннюю межень расход воды достаточно равномерный. В зимний период, когда на р. Оби установлен ледостав, на формирование химического состава воды большое влияние оказывают грунтовые и подземные воды, вклад которых в общий расход воды значительно увеличен. В это время происходит повышение концентрации ионов Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, биогенных элементов (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻), ХПК, а также содержание элементов первой группы (Li, B, Ti, Mn, Cu, Rb, Sr, Ba). В весенний период с увеличением водного стока в створе Оби за счёт талой снеговой воды, поступающей с водосборной площади городской территории во время снеготаяния, возрастает концентрация элементов второй группы (Be, Al, V, Pb, Fe).

Заключение

Таким образом, исследование динамики гидрохимического состава поверхностной воды р. Оби в районе г. Барнаула позволило

выявить следующие основные сезонные закономерности: в зимний период с понижением водного стока происходит обогащение речных вод (за счёт увеличения стока более минерализованных подземных вод) ионами Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, биогенными элементами (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻). Исключение составляет Si, содержание которого повышается в весенний период, что связано с поступлением его с водосборной площади. По результатам факторного анализа микроэлементного состава поверхностной воды было выделено несколько отдельных групп исследуемых элементов. Содержание элементов (Li, B, Ti, Mn, Cu, Rb, Sr, Ba) первой группы связано с поступлением химических элементов с подземным стоком реки и физико-химическими условиями зимнего периода. Содержание элементов второй группы (Be, Al, V, Pb, Fe) связано преимущественно с поверхностным стоком с водосборной площади в период весеннего половодья. В отдельную факторную группу входят Ni и Cd, концентрация которых повышалась в зимний и весенний периоды, но не превышала ПДК_{р.х.} во все периоды наблюдения.

Установлено превышение значений ПДК_{р.х.} для Cu до 3,7 раза во все гидрологические сезоны; для Al – до 6,8 раза, для Ti – до 2,7 раз; для Mn – до 4,6 раза и для Fe – до 2,4 раза в зимнюю межень и весеннее половодье. Выявлено превышение содержания органического вещества (по ХПК) до 3 раз в зимнюю межень. Для остальных исследуемых показателей превышение ПДК_{р.х.} не наблюдалось.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН, проект № 1021032424139-8.

References

1. Yablokov Yu.E. Surface water resources of the USSR Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. V. 10. Ch. 1. 478 p. (in Russian).
2. Dzhamalov R.G., Nikanorov A.M., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. The water of the oka river basin: Chemical composition and sources of pollution // Water and Ecology. 2017. No. 3. P. 114–132 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.114-132
3. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096

4. Dryupina E.Yu., Eyrikh A.N., Eyrikh S.S., Papina T.S. Substantiation of methods of calculation of allowable discharge limits in setting up a water disposal system in big cities (as exemplified by the city of Barnaul) // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 2. P. 48–54 (in Russian).
5. Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Current state of the Selenga river waters in the Russian territory concerning major components and trace elements // *Chemistry for sustainable development*. 2012. No. 20. P. 613–631 (in Russian).
6. Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga-Baikal system // *Mosc. Univ. Bull. Seriya 5 Geografiya*. 2016. No. 3. P. 67–81 (in Russian).
7. Kuklin A.P., Tsybekmitova G.Ts. Content of toxic elements in water and macroalgae of the Argun river (Russia) basin water courses // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-030-035
8. Papina T.S. Transport and distribution features of heavy metals in the series: water–suspended matter–bottom sediments of river ecosystems: Analytical review. Novosibirsk: GPNTB SO RAN, IVEP SO RAN, 2001. 58 p. (in Russian).
9. Linnik P.N., Iskra I.V. The role of dissolved organic substances in the migration of zinc, lead and cadmium in the reservoirs of the Dnieper // *Water resources*. 1997. V. 24. No. 4. P. 494–502 (in Russian).
10. Eirikh A.N., Tretyakova E.I., Papina T.S. Analytical control of heavy metals in bottom sediments of river ecosystems (on the example of the Ob River) // *World of Science, Culture, Education*. 2009. No. 5. P. 11–13 (in Russian).
11. Kanatnikova N.V., Kochkarev V.R. Heavy metals in drinking water and their characteristics // *Scientific Notes of Orel State University*. 2008. No. 2. P. 10–14.
12. Wood C.M., Farrell A.P., Brauner C.J. An introduction to metals in fish physiology and toxicology: Basic principles // *Homeostasis and toxicology of essential metals*. San Diego: Elsevier, 2011. P. 1–51.
13. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aquatic systems: critical contamination levels // *Geochemistry International*. 2019. V. 57. No. 7. P. 737–750. doi: 10.1134/S0016702919070085
14. Water of Russia. River basins / Ed. A. Chernyaev. Ekaterinburg: AKVA-PRESS, 2000. 536 p. (in Russian).
15. Kotovshchikov A.V., Dolmatova L.A. Dynamics of chlorophyll *a* content in the Ob river and its relationship with abiotic factors // *Inland Water Biol*. 2018. No. 1. P. 21–38 (in Russian). doi: 10.1134/S1995082918010078
16. Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers // *American Journal of Science*. 1982. V. 282. P. 401–450.
17. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2004. V. 5. P. 225–272.
18. Chertko N.K., Chertko E.N. Geochemistry and ecology of chemical elements. Minsk: Publishing Center of BSU, 2008. 140 p. (in Russian).
19. Papina T.S., Eirikh A.N., Serykh T.G., Dryupina E.Yu. Space and time regularities in the distribution of dissolved and suspended manganese form in the Novosibirsk reservoir water // *Water Resources*. 2017. V. 44. No. 2. P. 201–208. doi: 10.1134/S0097807817020105
20. Eirikh A.N., Serykh T.G., Stepanets V.N., Papina T.S. Microelement composition of the water of the Ob River near the city of Barnaul // *Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2018. V. 50. No. 3. P. 64–68 (in Russian).
21. Bagard M.L., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Viers J., Prokushkin A.S., Stille P., Rihs S., Schmitt A.D., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. V. 75. No. 12. P. 3335–3357.
22. Savenko V.S. Physical and chemical analysis of the processes of formation of iron-manganese nodules in the ocean. Moskva: GEOS Publ., 2004. 156 p. (in Russian).
23. Datsenko Yu.S. Peculiarities of formation of river runoff of manganese and iron during flood periods // *Water: chemistry and ecology*. 2018. No. 4–6. P. 3–6 (in Russian).

Гидрохимические условия формирования водно-болотных экосистем государственного природного заказника «Былина»

© 2022. Т. И. Кутявина, к. б. н., с. н. с., И. А. Варган, ст. преподаватель, Е. В. Шемякина, студент, В. В. Тимина, студент, Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36, e-mail: kutyavinati@gmail.com

Проведён анализ гидрохимических условий формирования водно-болотных экосистем, расположенных на территории и в окрестностях государственного природного заказника (ГПЗ) регионального значения «Былина». Болото Чистое, находящееся на территории ГПЗ «Былина», является одним из важнейших болотных резерватов России, для него характерны богатый видовой состав водоплавающих и болотных птиц, наличие редких видов растений и животных. Здесь берут своё начало несколько рек, протекающих по территории Кировской области. Вода, отобранная из б. Чистого и в 1,5 км от него, характеризуется кислой и слабокислой реакцией (pH 4,3–5,8) и низким содержанием растворённого кислорода. В воде б. Чистого отмечено высокое содержание биогенных элементов и органических веществ, что связано с интенсивными процессами разложения органического вещества в данной экосистеме. Сложившиеся условия неблагоприятны для развития прибрежно-водной растительности в водно-болотных экосистемах б. Чистого. Вода в водно-болотных экосистемах, расположенных в 3–4 км севернее ГПЗ «Былина», в поймах рек Пушма и Юг, характеризовалась низким содержанием соединений азота, фосфора и органических веществ, более высокой концентрацией растворённого в воде кислорода и значением pH 6,3–7,0. Условия среды в этих экосистемах более благоприятны для развития гидробионтов по сравнению с экосистемами б. Чистого, однако при увеличении содержания биогенных элементов в воде возможно развитие процессов эвтрофирования и заболачивания.

Полученные данные о химическом составе воды б. Чистого, находящегося на территории ГПЗ «Былина» и имеющего статус особо охраняемой природной территории более 27 лет, могут быть использованы в качестве фоновых показателей при изучении болотных экосистем сопредельных территорий.

Ключевые слова: водно-болотная экосистема, гидрохимический анализ, биогенные элементы.

Hydrochemical conditions for the formation of wetland ecosystems in the Bylina State Nature Reserve

© 2022. Т. И. Kutyavina ^{ORCID: 0000-0001-7957-0636}, И. А. Vartan ^{ORCID: 0000-0003-1663-385X},
Е. В. Shemyakina ^{ORCID: 0000-0002-9811-5193}, В. В. Timina ^{ORCID: 0000-0001-9129-9906}
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: kutyavinati@gmail.com

The article presents the results of an analysis of the hydrochemical conditions for the formation of wetland ecosystems located on the territory and in the vicinity of the state natural reserve of regional significance "Bylina". The swamp Chistoe located on the territory of the Bylina State Nature Reserve, is one of the most important marsh reserves in Russia, it is characterized by a rich species composition of waterfowl and marsh birds, the presence of rare species of plants and animals. Several rivers originating from the swamp Chistoye are flowing through the territory of the Kirov region. Water taken from the swamp Chistoye and 1.5 km from it is characterized by an acidic and slightly acidic reaction (pH 4.3–5.8) and a low content of dissolved oxygen. In water of the swamp Chistoye, a high content of biogenic elements and organic substances was noted, which is associated with intensive processes of decomposition of organic matter in this ecosystem. The current conditions are unfavorable for the development of coastal aquatic vegetation in wetland ecosystems of the swamp Chistoye. Water in wetland ecosystems located 3–4 km north from the Bylina State Nature Reserve, in the floodplains of the Pushma and Yug rivers, is characterized by a low content of nitrogen, phosphorus, and organic compounds, a higher concentration of oxygen dissolved in water, and a higher pH value. Environmental conditions in these ecosystems are more favorable for the development of aquatic organisms compared to ecosystems the swamp Chistoye, however, with an increase in the content of biogenic elements in water, the development of eutrophication and waterlogging processes is possible.

Obtained data on the chemical composition of water of the swamp Chistoye located on the territory of the state natural reserve "Bylina" and having the status of a specially protected natural area for more than 27 years, can be used as background indicators in the study of wetland ecosystems of adjacent territories.

Keywords: wetland ecosystem, hydrochemical analysis, biogenic elements.

Сведения о ненарушенном состоянии водоёмов необходимы для прогнозирования, оптимизации условий и разработки эффективных природоохранных и восстановительных мероприятий на водоёмах [1]. В этом отношении изучение водоёмов особо охраняемых природных территорий (ООПТ) позволяет рассмотреть функционирование водных экосистем в естественных условиях [2].

Государственный природный заказник (ГПЗ) регионального значения «Былина» был создан в 1994 г. в Подосиновском и Опаринском районах Кировской области с целью поддержания экологического баланса в северо-западной части региона, сохранения природных комплексов среднетаёжных лесов и верховых болот на водоразделе рек бассейнов Северного Ледовитого океана и Каспийского моря, а также для охраны редких и исчезающих видов животных и растений и мест их обитания. Общая площадь ГПЗ «Былина» достигает 48151,08 га, основную площадь заказника занимают водно-болотные и лесные экосистемы [3, 4]. Особую природоохранную ценность на территории ГПЗ «Былина» составляют три памятника природы регионального значения: «Кайское болото», «Былинское болото» и «Чистое (Роговское) болото». На болотах Чистое и Кайское находятся истоки рек Новгородка, Пелегова, Верховская и Яхреньгская Былина, Кая [5]. Болотные массивы, расположенные на территории ГПЗ «Былина», относятся к числу важнейших болотных резерватов России и регулируют водность крупнейших рек Кировской области. Научно-исследовательские работы, проводимые на территории заказника, посвящены изучению преимущественно флоры и фауны [6], в то время как данные о гидрохимическом составе водно-болотных экосистем ГПЗ «Былина» в научной литературе представлены фрагментарно. Получение данных о гидрохимическом составе болотных экосистем необходимо, так как эти экосистемы выполняют такие важные для биосферы функции, как регулирование гидрологического режима, геохимических процессов, сохранение видового разнообразия и др. Кроме того, результаты гидрохимического анализа болотных экосистем ООПТ могут быть использованы в качестве фоновых пока-

зателей при изучении и оценке состояния болотных экосистем сопредельных территорий.

Цель работы – определить условия формирования водно-болотных экосистем на территории ГПЗ «Былина» и в его окрестностях по результатам гидрохимического анализа.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были шесть участков водно-болотных экосистем, расположенных на территории и в окрестностях ГПЗ «Былина».

Участки № 1 и № 2 расположены в пределах Чистого (Роговского) болота в северо-западной части ГПЗ «Былина». Данное болото вытянуто в направлении с юго-запада на северо-восток более чем на 4 км, его площадь составляет 633,8 га. Здесь берут своё начало реки Новгородка и Верховская Былина, входящие в бассейны Северной Двины и Волги соответственно. Растительный покров болота представлен преимущественно пушицево-сфагновыми сообществами со значительным участием болотных кустарничков. Для б. Чистого характерны богатый видовой состав водоплавающих и болотных видов птиц, а также наличие на территории болотного массива редких видов растений и животных [7]. Участок № 1 расположен в центре б. Чистого, участок № 2 – на северо-восточной окраине болота.

Участок № 3 находится примерно в 1,5 км от б. Чистое в северо-восточном направлении в небольшой локальной осоковой болотной экосистеме с берёзовым сухостоем. Рядом с участком № 3 проходит грунтовая дорога.

Участки № 4, № 5 и № 6 расположены севернее ГПЗ «Былина» в 3–4 км от его северной границы. Участки № 4 и № 5 расположены вблизи грунтовой дороги, в пойме р. Пушма. Это небольшие болота, в растительном покрове которых преобладают осоки и рогуз.

Участок № 6 представляет собой обводнённый заброшенный песчано-гравийный карьер, окружённый сосновым молодняком. Карьер находится недалеко от р. Юг.

Отбор проб воды из водно-болотных экосистем проводили в августе 2021 г. во время маршрутного обследования изучаемой терри-

тории. Физико-химический анализ проб воды проводили в аккредитованной экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета по аттестованным методикам измерений. В ходе проведения анализа определяли органолептические показатели (запах, цветность, мутность), водородный показатель (рН), удельную электропроводность, содержание растворённого в воде кислорода, биогенных элементов (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), органических веществ (перманганатная окисляемость и химическое потребление кислорода (ХПК)), нефтепродуктов. Определение содержания NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} проводили фотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (ООО «Экротек», Россия), перманганатной окисляемости – титриметрическим методом, ХПК – фотометрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат 02-3М» (ГК «Люмэкс», Россия), нефтепродуктов – флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат 02-3М» (для экстракции использовали гексан). Показатель «нефтепродукты» является интегральным, представляет собой оценку суммарного содержания экстрагируемых из воды углеводов. Обычно этот показатель используется для оценки уровня загрязнения природных вод нефтью, однако в болотных водах, наряду с нефтяными углеводородами содержатся и биогенные углеводороды, образующиеся в процессе разложения и трансформации остатков растительного и животного происхождения и вымываемые из торфяных залежей [8]. Погрешность измерений составила 5–35%. Математическую обработку результатов проводили в соответствии с используемыми методиками измерений. Статистическую обработку результатов проводили в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Пробы воды, отобранные в разных водно-болотных экосистемах, существенно отличались по органолептическим показателям. Для воды, отобранной на б. Чистом (участки № 1 и № 2), отмечен слабый и очень слабый запах естественного происхождения (болотный). Вода, отобранная в 1,5–4 км на северо-восток от ГПЗ «Былина» (участки №№ 3–6), характеризовалась отсутствием запаха. Для проб воды, отобранных на участках № 4 и № 6, отмечены низкие значения цветности и мутности воды, средние показатели отмечены для участка № 3, максимальные значения цветности и мутности воды – для участков № 1, № 2

и № 5 (табл.). Причинами повышенной мутности воды может быть наличие в ней глины, неорганических соединений (гидроксида алюминия, карбонатов различных металлов), а также органических примесей или живых организмов, например, бактерио-, фито- или зоопланктона. Также причиной может быть окисление соединений железа и марганца кислородом воздуха, что приводит к образованию коллоидов [9]. Вероятно, именно последняя причина оказала влияние на высокое значение мутности воды в экосистемах б. Чистого. Цветность природных вод обусловлена главным образом присутствием гумусовых веществ и соединений трёхвалентного железа. Количество этих веществ зависит от геологических условий, водоносных горизонтов, характера почв, наличия болот и торфяников в бассейне реки и других причин.

По показателю рН наиболее благоприятными условиями для большинства гидробионтов обладают воды участков №№ 4–6, расположенных в 3–4 км на северо-восток от ГПЗ «Былина» (табл.). На этих участках воды характеризуются как нейтральные ($6,5 < \text{pH} < 7,5$). Такие значения рН благоприятны для развития большинства гидробионтов. Воды на окраине б. Чистого и в 1,5 км от него по величине рН относятся к группе слабокислых вод ($5 < \text{pH} < 6,5$). Такие значения рН характерны для водоёмов лесной зоны. Воды на участке № 1 (середина б. Чистого) по величине рН являются кислыми ($3 < \text{pH} < 5$). Такие низкие значения рН отмечаются при поступлении в воду угольной кислоты, фульвокислот и других органических кислот в результате разложения органических веществ. Низкое значение рН воды, отмеченное в середине б. Чистого, может оказать ингибирующее влияние на развитие прибрежно-водных растений [10] и других гидробионтов.

Величина удельной электропроводности значительно отличалась на участках №№ 1–3 (б. Чистое и его окраина) и №№ 4–6 (участки вблизи рек Пушма и Юг). Известно, что удельная электропроводность зависит от минерализации воды, является приблизительной характеристикой концентрации в воде неорганических электролитов (катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и анионов Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) [11]. Согласно этим данным, воды на участках №№ 4–6 более насыщены соединениями Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- по сравнению с водами участков №№ 1–3. По величине общей минерализации воды во всех исследуемых экосистемах являются ультрапресными. Исклю-

Таблица / Table

Результаты физико-химического анализа проб воды из водно-болотных экосистем, расположенных на территории и в окрестностях ГПЗ «Былина»
Results of physical and chemical analysis of water samples from wetland ecosystems located on the territory and in the vicinity of the Bylina State Nature Reserve

Показатель, единицы измерения Indicator, units of measurement	Участок отбора проб / Sampling area					
	б. Чистое swamp Chistoye	северо-восточная окраина б. Чистого northeastern edge of the swamp Chistoye	в 1,5 км на северо-восток от б. Чистого 1.5 km northeast of the swamp Chistoye	участки в пойме р. Пушма plots in the floodplain of the Pushma river		карьер вблизи р. Юг quarry near the Yug River
	1	2	3	4	5	6
Органолептические показатели / Organoleptic indicators						
Запах, баллы Smell, points	2	1	0	0	0	0
Цветность, градусы Color, degrees	> 500	> 500	243±10	24,8±3,7	436±16	16±2
Мутность, ед. мутности по формазину на 1 дм ³ Turbidity, units turbidity according to formazin per 1 dm ³	61±9	29±4	11,6±2,3	1,11±0,22	30±4	< 1
Физико-химические показатели / Physical and chemical indicators						
рН	4,3±0,2	5,8±0,2	5,5±0,2	7,0±0,2	6,3±0,2	6,5±0,2
Удельная электропроводность, мкСм/см Specific conductivity, μS/cm	34,4±3,4	69±7	40±4	283±14	451±23	229±11
Общая минерализация, мг/дм ³ General mineralization, mg/dm ³	25±4	49±8	29±5	200±18	322±29	160±15
Растворённый кислород, мг/дм ³ Dissolved oxygen, mg/dm ³	1,85±0,19	2,58±0,26	3,53±0,11	6,10±0,20	1,98±0,20	2,27±0,23
ХПК, мгО/дм ³ COD, mgO/dm ³	57±11	82±16	58±12	9,1±2,7	63±13	15±4
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³ Permanganate oxidizability, mgO/dm ³	70±7	50±5	26,4±2,6	3,57±0,36	13,6±1,4	3,57±0,36
Нефтепродукты, мг/дм ³ Oil products, mg/dm ³	0,032±0,011	0,013±0,005	0,0073±0,0037	0,027±0,010	0,015±0,005	0,057±0,020

чение составили только водно-болотные экосистемы в пойме р. Пушма. На этих участках воды являются пресными.

Азот и фосфор являются биогенными элементами, необходимыми для существования и развития живых организмов. Высокое

содержание соединений азота и фосфора в воде может стимулировать развитие процессов эвтрофирования. Согласно полученным результатам, воды б. Чистого (участки № 1 и № 2) более богаты соединениями азота, чем воды участков №№ 3–6 (рис.). Вероятно, это

связано с тем, что в экосистеме б. Чистого процессы разложения органического вещества идут более интенсивно, чем в экосистемах в пойме р. Пушма и вблизи р. Юг (участки №№ 3–6). В воде, отобранной на участках исследования № 1, № 2 и № 5 отмечено довольно высокое содержание NH_4^+ (3,3–7,9 мг/дм³). Для сравнения, содержание NH_4^+ в фоновых створах крупнейших рек Кировской области в 2021 г. составляло 0,20–0,84 мг/дм³ [12] (рис.). Содержание PO_4^{3-} в изучаемых болотных экосистемах составляло от 0,05 до 1,27 мг/дм³. Отмечена тесная корреляционная связь между содержанием в воде NH_4^+ и PO_4^{3-} ($r = 0,98$). На содержание в воде минеральных форм фосфора, как и на содержание минеральных соединений азота, влияют процессы фотосинтеза и разложения органического вещества. Процессом, уменьшающим содержание фосфатов в воде, является потребление PO_4^{3-} макрофитами, фитопланктоном и фитобентосом [13]. Минимальное содержание PO_4^{3-} (на уровне предела обнаружения методики измерений) и NH_4^+ зафиксировано нами на участках № 4 и № 6 (в пойме р. Пушма и вблизи р. Юг), где было отмечено довольно большое количество высших водных и прибрежно-водных растений. Вероятно, такие низкие концентрации NH_4^+ и PO_4^{3-} связаны с потреблением их высшими растениями.

Содержание биогенных элементов и органических веществ в болотных водах, питающих водные объекты, оказывает влияние на качество воды в водоёмах и водотоках. Содержание легкоокисляемых органических веществ, определённое по показателю перманганатная окисляемость, уменьшалось в направлении от середины б. Чистого (участка № 1) к его окраине (участок № 2) и далее к участку № 3. На участках №№ 4–6 значения перманганатной окисляемости были в несколько раз ниже, чем в воде б. Чистого. Содержание органических веществ уменьшалось в направлении от участка № 5 к участкам № 4 и № 6. Наибольшее значение ХПК, свидетельствующее о высоком содержании трудноокисляемых органических веществ, было отмечено в воде, отобранной на окраине б. Чистого (участок № 2), несколько ниже значения ХПК были отмечены на участках № 1, № 3 и № 5. На участках № 4 и № 6 содержание трудноокисляемых органических веществ (по ХПК) было минимальным. В фоновых створах крупнейших рек Кировской области в 2021 г. величина ХПК составляла 15,8–46,6 мгО/дм³ [12]. Содержание углеводов, определённое по показателю «нефтепродукты» также, как и содержание органических веществ (по ХПК и перманганатной окисляемости), уменьшалось при продвижении от середины

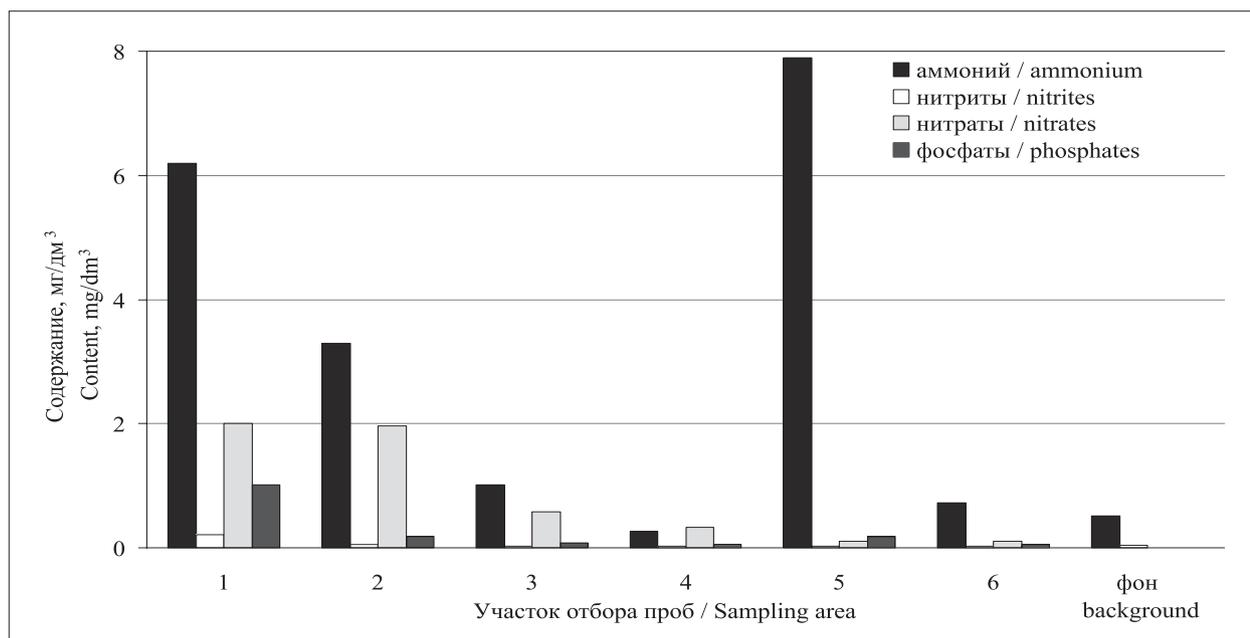


Рис. Содержание минеральных форм азота и фосфора в исследуемых экосистемах (обозначения участков отбора проб указаны в таблице, в качестве фона использованы фоновые створы крупнейших рек Кировской области [12])

Fig. The content of mineral forms of nitrogen and phosphorus in the studied ecosystems (designations of sampling sites are indicated in the table, background sections of the largest rivers of the Kirov region were used as a background [12])

б. Чистого к его окраине и далее, за пределы болота при продвижении на северо-восток к пойме р. Пушма. Это объясняется тем, что на окраине болота и на участках в пойме реки складываются более благоприятные условия для окисления органических веществ (выше значение рН и содержание растворённого кислорода). Довольно высокое содержание нефтепродуктов было обнаружено в воде заброшенного песчано-гравийного карьера (участок № 6). Причиной высокого содержания в воде нефтепродуктов на данном участке могла стать антропогенная деятельность. В целом, содержание нефтепродуктов в воде исследуемых водно-болотных экосистем сопоставимо с содержанием нефтепродуктов в воде крупнейших рек региона, которое в 2021 г. составило 0,01–0,02 мг/дм³ [12].

Для пяти из шести исследуемых водных объектов отмечено довольно низкое содержание растворённого в воде кислорода. Известно, что в поверхностных водах массовая концентрация растворённого кислорода подвержена значительным сезонным и суточным колебаниям. В эвтрофированных и богатых органическими соединениями водных объектах, а также в конце длительного подлёдного периода может иметь место значительный дефицит кислорода. Уменьшение массовой концентрации растворённого кислорода до 2 мг/дм³ вызывает массовую гибель рыб и других гидробионтов [14]. Такое низкое содержание растворённого в воде кислорода (менее 2 мг/дм³) отмечено нами на участках № 1 (середина б. Чистого) и № 5 (участок в пойме р. Пушма).

Заключение

По результатам органолептического и физико-химического анализов нами были определены гидрохимические условия формирования водно-болотных экосистем на территории и в окрестностях ГПЗ «Былина». Болото Чистое, находящееся на территории ГПЗ «Былина», – один из важнейших болотных резерватов России, для которого характерны богатый видовой состав водоплавающих и болотных птиц, а также наличие редких видов растений и животных. Здесь находятся истоки нескольких рек, протекающих по территории Кировской области. В воде б. Чистого было обнаружено высокое содержание биогенных элементов и органических веществ, что связано с интенсивными процессами разложения органического вещества в данной

экосистеме. В экосистемах, расположенных в 3–4 км в северном направлении от границы ГПЗ «Былина» (водно-болотные экосистемы в пойме р. Пушма и р. Юг) процессы фотосинтеза преобладают над процессами разложения органического вещества и доступные формы соединений азота и фосфора потребляются высшими растениями. В настоящее время содержание биогенных элементов и органических веществ в воде на данных участках намного ниже, чем в экосистемах б. Чистого. Однако при увеличении содержания биогенных элементов в воде возможно развитие процессов эвтрофирования и последующего заболачивания данных водных объектов. При сопоставлении данных о содержании NH_4^+ , NO_2^- , нефтепродуктов и значений ХПК в исследуемых экосистемах и в фоновых створах крупнейших рек Кировской области было отмечено, что содержание органических веществ в речных и болотных экосистемах находится примерно на одном уровне, а содержание NH_4^+ в болотных экосистемах выше, чем в речных водах.

Водно-болотные экосистемы б. Чистого, входящие в состав ГПЗ «Былина», являются ООПТ с 1994 г., то есть антропогенное воздействие на этой территории ограничено уже более 27 лет. В связи с этим данные о химическом составе воды водно-болотных экосистем на территории ГПЗ «Былина» могут рассматриваться как фоновые значения при изучении водно-болотных экосистем сопредельных территорий.

Работа выполнена при поддержке гранта ВОО «РГО» «Структура, экологическое состояние и эволюция ландшафтов Северных Увалов – главного водораздела северо-востока Русской равнины» (договор № 08/2021-Р).

References

1. Prytkova M.Ya. Scientific foundations and methods for the restoration of lake ecosystems under different types of anthropogenic impact. Sankt-Peterburg: Nauka, 2002. 148 p. (in Russian).
2. Gorokhova O.G. Characteristics of the trophic state of small water bodies of the Middle Volga Biosphere Reserve in terms of phytoplankton // Voda: khimiya i ekologiya. 2013. No. 11. P. 46–53 (in Russian).
3. Specially protected natural territories of the Kirov region. State natural reserve of regional significance “Bylina”: buklet Departamenta ekologii i prirodopolzovaniya Kirovskoy oblasti. Kirov: KOGBU “Oblastnoy prirodokhrannyy tsentr”, 2014. 16 p. (in Russian).

4. Ryabova E.V., Ryabov V.M. The role of protected areas in the Kirov region in the formation of ecological culture of the population // From ecological education to the ecology of the future: sbornik materialov i dokladov VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po ekologicheskomu obrazovaniyu / Ed. V.A. Grachev. Moskva: Nepravitelstvennyy ekologicheskiy fond imeni V.I. Vernadskogo, 2020. P. 2362–2366 (in Russian).
5. Timina V.V., Slesareva E.V., Krysov A.A. Natural conditions and landscapes of the Bylina State Processing Plant // “Society, education, science in modern development paradigms”: sbornik trudov po materialam II Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Eds. E.P. Masyutkin, T.N. Popova. Kerch: FGBOU VO “KGMTU”, 2021. P. 117–122 [Internet resource] http://www.kgmtu.ru/documents/nauka/obchshestvo_obrazovanie_nauka_v_sovremennyh_paradigmah_razvityiya2021.pdf (Accessed: 24.04.2022) (in Russian).
6. Ryabov V.M., Ashikhmina T.Ya. Faunistic characteristics and monitoring data of vertebrates in the territory of the state natural reserve “Bylina” // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 79–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-079-084
7. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Ryabov V.M. The current state and topical problems of biodiversity conservation of the PA “Horse Bog “Chistoe” // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010. No. 26-1 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-aktualnye-problemy-sohraneniya-bioraznoobraziya-oopt-verhovoe-boloto-chistoe> (Accessed: 24.04.2022) (in Russian).
8. Russkikh I.V., Strelnikova E.B., Serebrennikova O.V., Voistinova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A. Identification of hydrocarbons in the waters of the swamps of the southern taiga of Western Siberia // Geokhimiya. 2020. V. 65. No. 4. P. 405–414 (in Russian).
9. GOST R 57164-2016. Drinking water. Methods for determining odor, taste and turbidity. Moskva: Standartinform, 2019. 23 p. (in Russian).
10. Zinoveva A.E., Durnikin D.A. Influence of the active reaction of water (pH) on the distribution of aquatic and coastal aquatic plants in water bodies in the south of the Ob-Irtysh interfluvium // Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. No. 3. P. 21–24 (in Russian).
11. RD 52.24.495-2005. Guidance document. Hydrogen index and electrical conductivity of waters. Method for performing measurements by the electrometric method. Rostov-na-Donu: Gidrokhimicheskiy institut, 2005. 17 p. (in Russian).
12. 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. [Internet resource] <https://www.kirovreg.ru/econom/ecology/%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%202021.pdf> (Accessed: 30.05.2022) (in Russian).
13. Hydrochemistry handbook / Ed. A.M. Nikanorov. Leningrad: Girometeoizdat, 1989. 392 p. (in Russian).
14. RD 52.24.419-2019. Mass concentration of dissolved oxygen in waters. Measurement technique by iodometric method. Rostov-na-Donu: Gidrokhimicheskiy institut, 2020. 28 p. (in Russian).

Тяжёлые металлы в снежном покрове и городских почвах© 2022. Е. А. Горностаева¹, к. б. н., доцент,Г. И. Березин¹, к. б. н., доцент,Е. В. Дабах², к. б. н., с. 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: ea_gornostaeva@vyatsu.ru

Проведена оценка загрязнения снежного покрова и почв разных функциональных зон г. Кирова тяжёлыми металлами (ТМ). Судя по состоянию снежного покрова, уровень загрязнения воздуха Zn, Cu, Pb, Ni, Cd в зимний период в разных функциональных зонах северной части города и на фоновой территории различается незначительно, но существенно варьирует по годам наблюдений. Выявлена корреляционная связь ($r = 0,98-0,99$) между содержанием ТМ в снежном покрове и их валовым содержанием в почве.

Показано, что уровень загрязнения почв будет зависеть от выбранных фоновых показателей. При отсутствии превышений ориентировочно допустимых концентраций валовых форм ТМ показатель суммарного загрязнения (Z_c) соответствует среднему уровню загрязнения почв в промышленной зоне. Загрязнение диагностируется по накоплению подвижных соединений ТМ, причём коэффициенты подвижности (показатели, не зависящие от выбранного фона) позволяют оценить риск накопления в почвах Pb и Cd в обменной и связанной с карбонатами формах в промышленной, а также в рекреационной зонах северной части города, как очень высокий.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, аккумуляция, снежный покров, городские почвы, урбанизированные территории, атмосферный воздух.

Heavy metals in snow cover and urban soils© 2022. E. A. Gornostaeva¹ ORCID: 0000-0003-4888-5736^{*}G. I. Berezin¹ ORCID: 0000-0002-0603-0652^{*}E. V. Dabakh² ORCID: 0000-0002-6088-4819^{*}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: ea_gornostaeva@vyatsu.ru

The pollution of snow cover and soils of different functional zones of the city of Kirov with heavy metals (HM) has been assessed. Judging by the state of the snow cover, the level of air pollution with Zn, Cu, Pb, Ni, Cd in winter in different functional zones of the northern part of the city and in the background territory differs slightly, but varies significantly over the years of observation. A correlation was found ($r = 0.98-0.99$) between the content of HMs in the snow cover and their total content in the soil.

It is shown that the level of soil pollution depends on the selected background indicators. In the absence of excess of gross forms of HM over approximate permissible concentrations, the indicator of total pollution (Z_c) corresponds to the average level of soil pollution in the industrial zone. Pollution is diagnosed by the accumulation of mobile HM compounds, and the mobility coefficients (indicators that do not depend on the selected background) make it possible to assess the risk of accumulation of Pb and Cd in soils in exchangeable and carbonate-related forms in the industrial, as well as in the recreational areas of the northern part of the city, as very high.

Keywords: heavy metals, accumulation snow cover, urban soils, urbanized areas, atmospheric air.

Кировская область – это промышленно развитый регион России. Основой экономического потенциала г. Кирова является производственная сфера (машиностроение и металлообработка, металлургическое производство) [1].

Промышленные предприятия сосредоточены в основном в северной части города. Вследствие высокой плотности предприятий разного профиля, в том числе тепловой электростанции (ТЭЦ-4), наличия развитой инфраструктуры (автомобильные, железнодорожные пути) тип загрязнения этой территории можно охарактеризовать как мозаичный.

В ряде работ, отражающих состояние окружающей среды (ОС) в г. Кирове, отмечен преимущественный вклад металлообрабатывающих предприятий, электроэнергетики, а также автотранспорта в загрязнение компонентов урбанизированной экосистемы тяжёлыми металлами (ТМ) [1–4]. Повышенным содержанием Pb, Cu и Zn (относительно фона) и токсичностью для тест-организмов характеризовались пробы снега, отобранные с участков, расположенных вблизи ТЭЦ-5 [5]. Также было выявлено загрязнение снежного покрова Cu и Ni, особенно вблизи автотрасс и промплощадок [6]. Отмечалось загрязнение снега Cd [7]. Для почв г. Кирова были отмечены особенности, присущие почвам многих городов: щелочная реакция, высокое содержание органического вещества, превышающее предельно допустимые концентрации (ПДК) содержание подвижных форм Zn, Cu, Ni, Pb при невысокой концентрации их валовых форм. Выявлена токсичность городских почв, как около перекрестков дорог, так и в парковой зоне [8].

Цель настоящей работы – оценить содержание тяжёлых металлов в снежном покрове и почвах в различных функциональных зонах г. Кирова, а также риски загрязнения почв подвижными соединениями тяжёлых металлов.

Объекты и методы исследования

Город Киров расположен на северо-востоке европейской части России в подзоне южной тайги в условиях умеренного континентального климата. Территория находится в зоне достаточного увлажнения: среднегодовое количество осадков – в пределах 560–580 мм, 60–70% выпадает в тёплое время года. Количество осадков, выпавших в зимний период 2020 и 2021 гг., превышало средние многолетние данные и составляло в 2020 г. – 196 мм

(144% от нормы), в 2021 г. – 170 мм (125% от нормы). Преобладающими ветрами в течение года являются юго-юго-западные, повторяемость южных ветров составляет около 20%, юго-западных – 18%. В январе частота юго-юго-западных ветров возрастает до 45%. Преобладание этих ветров отмечено и в 2020–2021 гг. – в годы отбора проб снега [9–11].

Объектами исследования были пробы снега и почв, отобранные на территории г. Кирова в зонах с разной функциональной нагрузкой: рекреационная, транспортная, промышленная (рис.). Промышленная зона представлена участками № 1 (вблизи машиностроительного предприятия – ОАО «Авиатек») и № 3 (в районе ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов»). Участок № 4 расположен в транспортной зоне вблизи крупного электромашиностроительного предприятия – ОАО «Лепсе». Рекреационная зона представлена участком № 2, находящимся на территории парка Победы. Условно фоновая территория – памятник природы «Дендропарк лесоводов Кировской области» расположена в слободе Сошени Нововятского района г. Кирова.

Отбор проб снега проводили в конце зимнего периода (конец марта) до начала активного снеготаяния в 2020 и 2021 гг. в соответствии с РД 52.04.186-89, ГОСТ 17.1.5.05-85 и [12]. Содержание ТМ в фильтрате снеговой воды определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ФР 1.31.2018.29677).

Пробы городских почв отбирали на тех же участках – №№ 1–4 и на фоновой территории (рис.) в мае 2021 г. по ГОСТ 17.4.3.01-2017. В них определяли валовые и подвижные формы ТМ, входящих в типичную для городских почв ассоциацию [13] – Zn, Cu, Pb, Ni, а также Cd методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно ФР 1.31.2018.31189. Кроме того, в почвенных образцах определяли pH_{KCl} (ГОСТ 26483-85) для корректной оценки содержания ТМ по сравнению с ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК).

Математическую обработку полученных результатов проводили в соответствии с требованиями методик количественного химического анализа.

Состояние городских почв оценивали согласно СанПиН 1.2.3685-21. Интенсивность накопления химических элементов в ОС определяли с помощью коэффициента концентрации K_c элемента, оценку загрязнения снежного покрова и почв производили по показателю суммарного загрязнения:

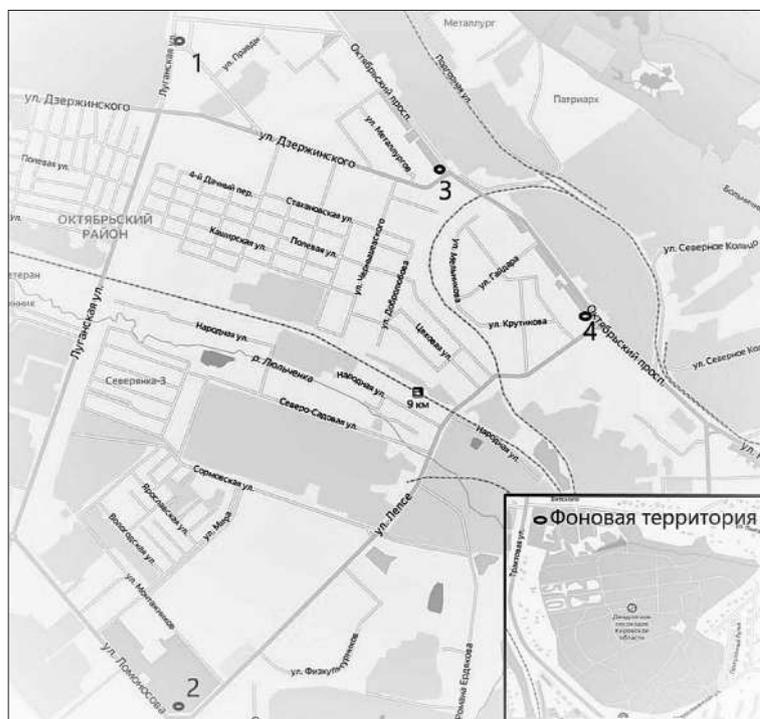


Рис. Схема расположения участков отбора проб снега и почв
 Fig. Layout of snow and soil sampling sites

$$Z_c = \sum K_{ci} - (n - 1), \quad (1)$$

где Z_c – суммарный показатель загрязнения; K_{ci} – коэффициенты концентрации элементов, представляющие отношение концентрации элемента в образце к фоновой концентрации; n – число химических элементов с $K_{ci} > 1$.

Коэффициент подвижности ТМ вычисляли по формуле:

$$K_{п} = \frac{C_{пф}}{C_{вф}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $C_{пф}$ – содержание подвижной формы металла в почве, мг/кг; $C_{вф}$ – содержание валовой формы металла в почве, мг/кг.

Оценку подвижности ТМ давали по шкале рисков [14], согласно которой риск выхода металла в раствор и попадания в пищевые цепи (Risk Assessment Code – RAC) отсутствует, если доля металла в обменной и связанной с карбонатами форме < 1%, малый – 1–10%, средний – 11–30%, высокий – 31–50%, очень высокий – 50% и выше.

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания ТМ в пробах снега, отобранных в 2020 г. и 2021 г., представлены в таблице 1. Содержание Pb варьирует от 0,44 до 0,174 мг/дм³. Во второй

год отбора его количество на всех участках значительно ниже. Максимальное накопление Pb как в 2020, так и в 2021 гг. выявлено на участке № 4, что вполне закономерно, так как участок находится в транспортной зоне около крупной дорожной развязки. Содержание Cd, напротив, в 2021 г. на всех площадках пробоотбора существенно выше, чем в предыдущем году. Различия в концентрации Cd в пробах снега из разных функциональных зон в 2020 г. незначительны, в пределах погрешности измерения, в 2021 г. наиболее низкое содержание отмечали в промзоне (участки 1 и 2). Максимальное количество Zn выявлено на фоновом участке в пробе, отобранной в 2020 г. Концентрация Zn в ней была на порядок выше, чем в других пробах. Повышенное содержание элемента отмечено также на участке № 3 в 2021 г. Возможно, это связано с выбросами завода по обработке цветных металлов, вблизи которого отбирали пробы снега.

В целом результаты определения ТМ в пробах снежного покрова, отобранных в разных функциональных зонах северной части г. Кирова, показывают мозаичность распределения ТМ в пространстве, отсутствие закономерного изменения во времени (по двухлетним данным), небольшие различия концентраций ТМ на участках наблюдения по сравнению с фоном (в основном в пределах 2-кратного превышения).

Таблица 1 / Table 1

Содержание тяжёлых металлов (мг/дм³) и коэффициент концентрации в пробах снега, отобранных в 2020 и 2021 гг. / Heavy metal content (mg/dm³) and concentration factor in snow samples taken in 2020 and 2021

Участок Area	Pb	Cd	Zn	Cu	Ni
2020 год / 2020 year					
Фон Background	0,122±0,028	0,002±0,001	0,068±0,018	0,008±0,002	0,074±0,015
1	<u>0,103±0,024*</u> 0,8	<u>0,003±0,001</u> 1,5	<u>0,003±0,001</u> <0,1	–	–
2	–	<u>0,003±0,001</u> 1,5	<u>0,006±0,002</u> 0,1	<u>0,006±0,001</u> 0,8	<u>0,063±0,013</u> 0,9
3	<u>0,121±0,028</u> 1,0	<u>0,004±0,001</u> 2,0	<u>0,011±0,003</u> 0,2	<u>0,009±0,002</u> 1,1	<u>0,045±0,013</u> 0,6
4	<u>0,17±0,04</u> 1,4	<u>0,004±0,001</u> 2,0	<u>0,006±0,002</u> 0,1	<u>0,005±0,001</u> 0,6	<u>0,060±0,013</u> 0,8
2021 год / 2021 year					
Фон Background	0,054±0,012	0,014±0,003	0,005±0,001	0,054±0,012	0,014±0,003
1	<u>0,044±0,012</u> 0,8	<u>0,005±0,001</u> 0,4	<u>0,005±0,001</u> 1,0	–	–
2	<u>0,064±0,015</u> 1,2	<u>0,010±0,002</u> 0,7	<u>0,003±0,001</u> 0,6	–	–
3	<u>0,097±0,022</u> 1,8	<u>0,012±0,002</u> 0,9	<u>0,026±0,007</u> 5,2	–	–
4	<u>0,111±0,025</u> 2,1	<u>0,013±0,002</u> 1,0	<u>0,008±0,002</u> 1,6	–	–

Примечание: * – над чертой – содержание ТМ, под чертой – коэффициент концентрации; «–» – результат измерения ниже предела обнаружения метода.

Note: * – above the line – HM content, below the line – concentration factor; “–” – the measurement result is below the detection limit of the method.

Таблица 2 / Table 2

Показатель суммарного загрязнения тяжёлыми металлами снежного покрова исследуемых участков г. Кирова / Indicator of total pollution of snow cover by heavy metals in the studied areas of the city of Kirov

Показатель суммарного загрязнения Total pollution index	Участок / Area			
	1	2	3	4
2020 год / 2020 year	1,5	1,5	2,1	2,4
2021 год / 2021 year	–	1,2	6,0	2,7

Примечание: прочерк обозначает, что показатель не может быть рассчитан.

Note: the dash indicates that the indicator cannot be calculated.

По показателю суммарного загрязнения снега ТМ выделяются участки № 3 и № 4 (табл. 2). Наиболее высокое его значение, обусловленное повышенной концентрацией Zn в пробах, отобранных около завода по обработке цветных металлов, может быть связано с выбросами предприятия.

Представленные результаты и немногочисленные данные по анализу снеговой воды в г. Кирове [6, 7] позволяют сделать вывод о том, что в северной промышленной части города аккумуляция ТМ в снежном покрове происходит интенсивнее (особенно Pb) даже по сравнению с нагруженными перекрёстка-

ми центральной части города. Несомненно, это обусловлено активным движением грузового транспорта в северной части города и ограничением его движения в центре. Господствующее направление ветров также способствует переносу загрязняющих веществ в северную и северо-восточную части города. Необходимо отметить, что пробы, отобранные в рекреационной зоне (парк лесоводов – фон и парк Победы – участок № 4), по содержанию рассматриваемых ТМ часто не отличаются от проб снега из промышленной части города, а в некоторых случаях содержат значительно больше ТМ (табл. 1). Таким образом, судя по

состоянию снежного покрова, уровень загрязнения воздуха ТМ в зимний период в разных функциональных зонах промышленной северной части города и на фоновой территории различается незначительно и существенно варьирует по годам наблюдений.

В 2021 г. было определено содержание ТМ в почвах (табл. 3). Почвы рассматриваемых участков, как и других территорий г. Кирова [8], отличаются от дерново-подзолистых почв подзоны южной тайги нейтральной или слабощелочной реакцией (pH_{KCl} 6,1–7,1), что характерно для городских почв (табл. 3). Исключением являются ненарушенные лесные почвы фонового участка, в образце которых значение pH_{KCl} 4,9 соответствует зональным дерново-подзолистым почвам. Количество валовых форм всех ТМ не превышало значений ОДК ни на одном из участков. Однако, как и в снеговой воде, в почвах на участках №№ 3 и 4 концентрации всех ТМ значительно выше.

Следует отметить, что высокие и близкие по значениям к указанным в таблице 3 концентрации валовых и подвижных форм изучаемых ТМ в северной части города были выявлены ранее [8]. На территории завода обработки цветных металлов содержание подвижной Cu варьирует в диапазоне 1,7–25 мг/кг, Pb – 1,0–6,6 мг/кг [15]. Выявленные около завода (участок №3) концентрации металлов в почвах соответствуют этому диапазону (табл. 3). В то же время содержание подвижных соединений Cd и Ni ниже, а Zn значительно выше указанных в [15] диапазонов. Загрязнение почв соединениями Zn и Pb в селитебной зоне г. Кирова с транспортной нагрузкой было отмечено в [16]: содержание валовых форм Zn в 2 раза превышало ПДК, а подвижных – в 3 раза, концентрации Pb были на уровне ПДК. Согласно [17], доля выбросов автотранспорта в загрязнении атмосферы в городе достигает почти 50%.

Таблица 3 / Table 3

Содержание валовых, подвижных форм ТМ и коэффициент концентрации их на исследуемых участках в 2021 г. / The content of gross content, mobile forms of heavy metals and concentration coefficient in the studied areas in 2021

Содержание элемента, мг/кг Element content, mg/kg	Фон Background	Участок / Area				ПДК (ОДК) mg/kg MPC (APC) mg/kg	
		1	2	3	4		
pH_{KCl}	4,9±0,2	7,1±0,2	7,0±0,2	6,1±0,2	7,0±0,2	–	
Валовая форма Gross content	Cu	3,7±0,9	<u>6,9±1,6*</u> 1,9	<u>5,0±1,2</u> 1,4	<u>46±11</u> 12,4	<u>38±9</u> 10,3	66–132**
	Pb	2,6±0,5	<u>4,8±1,0</u> 1,9	<u>2,6±0,4</u> 1,0	<u>4,2±0,9</u> 1,6	<u>24±5</u> 9,2	65–130**
	Zn	21±7	<u>30±10</u> 1,4	<u>18±6</u> 0,9	<u>190±60</u> 9,2	<u>140±50</u> 6,9	110–220**
	Ni	13,4±3,7	<u>11,6±3,8</u> 0,9	<u>9,2±3,1</u> 0,7	<u>47±13</u> 3,5	<u>16±4</u> 1,2	40–80**
	Cd	0,20±0,03	<u>0,20±0,10</u> 1,0	<u>0,20±0,10</u> 1,0	<u>0,30±0,10</u> 1,5	<u>0,90±0,20</u> 4,5	1–2**
Подвижная форма Mobile form	Cu	0,06±0,02	<u>0,50±0,10</u> 8,3	<u>0,15±0,04</u> 2,5	<u>6,0±1,4</u> 100,0	<u>2,1±0,5</u> 35,0	3
	Pb	1,60±0,30	<u>1,8±0,4</u> 1,1	<u>1,9±0,4</u> 1,2	<u>3,7±0,8</u> 2,3	<u>4,9±1,0</u> 3,1	6
	Zn	1,1±0,4	<u>6,2±2,1</u> 5,6	<u>2,6±0,9</u> 2,4	<u>36±12</u> 32,7	<u>30,00±10</u> 27,3	23
	Ni	0,30±0,10	<u>0,95±0,39</u> 3,2	<u>0,30±0,10</u> 1,0	<u>0,60±0,30</u> 2,0	<u>0,60±0,30</u> 2,0	4
	Cd	0,04±0,01	<u>0,10±0,03</u> 2,5	<u>0,16±0,05</u> 4,0	<u>0,06±0,02</u> 1,5	<u>0,70±0,20</u> 17,5	0,65–1,11 [15]

Примечание: «–» – значение отсутствует; * – над чертой – содержание ТМ, под чертой – коэффициент концентрации; ** – первая цифра – значение ОДК соответствует глинистым и суглинистым почвам с $pH_{KCl} < 5,5$, вторая – с $pH_{KCl} > 5,5$.

Note: “–” – no value; * – above the line – HM content, below the line – concentration factor; ** – the first digit in the APC value corresponds to acidic (clayey and loamy), $pH_{KCl} < 5.5$, the second for close to neutral and neutral (loamy and clayey), $pH_{KCl} > 5.5$.

Таблица 4 / Table 4

Показатель суммарного загрязнения ТМ почв исследуемых участков г. Кирова
Index of total heavy metal contamination of soils in the studied area of Kirov

Участки / Area	Содержание ТМ, мг/кг Element content, mg/kg					Z_c^*	Z_c^{**}
	Cu	Pb	Zn	Ni	Cd		
Региональный фон (общий) Regional background (general)	28	12	58	33	0,65– 1,11	–	–
Фон для г. Кирова Background for the city of Kirov	65	20	157	96			
Условный фон (дендропарк) Conditional background (arboretum)	3,7	2,6	21	13,4	0,2		
1	6,9	4,8	30	11,6	0,2	3,1	–
2	5	2,6	18	9,2	0,2	1,4	–
3	46	4,2	193	47	0,3	24,3	4,4
4	38	24	144	15,5	0,9	28,0	2,8

Примечание: * – Z_c рассчитан с учётом условного фона (дендропарк), ** – Z_c рассчитан с учётом регионального фона [18], прочерк – показатель не имеет смысла.

Note: * – Z_c calculated taking into account the conditional background (arboretum), ** – Z_c calculated taking into account the regional background [18], dash – the indicator does not make sense.

Состояние почв в промышленной части г. Кирова оценивали согласно СанПиН 1.2.3685-21, исходя из класса опасности металла и его содержания в почве. Слабая степень загрязнения ТМ 1 класса опасности – Pb, Zn и Cd, соответствующая диапазону концентраций от «2 фоновых до ПДК», выявлена в промышленно-транспортной зоне (участок № 4), а также Zn – в промышленной зоне (участок № 3). Слабая степень загрязнения Cu и Ni отмечена около завода обработки цветных металлов (участок № 3), Ni – у электромашиностроительного завода (участок № 4).

Показатель суммарного загрязнения ТМ (табл. 4), рассчитанный с учётом фоновых почв дендропарка, позволяет оценить состояние почв на участках №№ 1 и 2 как удовлетворительное ($Z_c < 16$), а на участках №№ 3 и 4 ($Z_c = 16–32$) отметить среднюю степень загрязнения почв и умеренно-опасную категорию загрязнения. Коэффициенты концентрации и, соответственно, показатели суммарного загрязнения зависят от содержания ТМ в фоновых почвах. Подобрать фоновый участок для городских почв проблематично. Ненарушенные дерново-подзолистые кислые почвы дендропарка не очень удачный вариант для сравнения с нейтральными и щелочными почвами города. Если для расчётов использовать данные по общему региональному фону [15, 18], то состояние почв на участках №№ 3 и 4 оценивается как удовлетворительное. Если ориентироваться на фоновые показатели непосредственно для почв г. Кирова [18], то полученные данные сопоставимы (табл. 4).

При экодиагностике состояния почв рекомендуют оценивать долю подвижных соединений ТМ от их общего содержания, поскольку этот показатель характеризует возможность перехода элемента в сопредельные среды, доступные для растений формы [19]. Однако содержание подвижных соединений ТМ подвержено значительной пространственной и временной вариабельности, обусловленной погодными, биотическими и антропогенными воздействиями. Доля подвижных соединений в загрязнённых почвах выше, чем в незагрязнённых, причём при полиметалльном загрязнении подвижность металлов в почве выше, чем при монометалльном, а многолетнее загрязнение ТМ ведёт к большему росту содержания их подвижных соединений по сравнению с однократным внесением [20, 21]. Также было отмечено, что с ростом дозы загрязняющего вещества происходит увеличение подвижных соединений элементов и их доли от валового содержания; наибольшая подвижность Pb, Zn и Cd была выявлена при комплексном загрязнении почв ТМ [22].

Концентрации подвижных соединений ТМ (табл. 3) в основном не превышают ПДК, однако в промышленной зоне (участки №№ 3 и 4) отмечено повышенное содержание подвижного Zn, а в районе завода по обработке цветных металлов (участок № 4) – двукратное превышение допустимой концентрации Cu.

Коэффициенты концентрации подвижных форм соответствующих элементов относительно условного фона (почв дендропарка)

Коэффициент подвижности тяжёлых металлов в почве
Mobility coefficient of heavy metals in soil

Участок / Area	Коэффициенты подвижности ТМ, % Mobility coefficients of heavy metals, %				
	Cu	Pb	Zn	Ni	Cd
Фон / Background	1,6	61,5	5,2	2,2	20
1	7,2	37,5	20,7	8,2	50
2	3	73,1	14,4	3,2	80
3	13	88,0	18,7	1,3	20
4	5,5	20,4	20,8	3,9	78

значительно выше, чем валовых форм, что также подтверждает загрязнение городских почв (табл. 3). Особенно заметны отличия K_c подвижных и валовых форм Cu и Zn на участках №№ 3 и 4.

По данным [23] коэффициенты подвижности – доля подвижных соединений от валового содержания ТМ для фоновых почв составляет 2–10%; при уровне загрязнения, соответствующем 1 ОДК, – 15–30%; для комплексного загрязнения этот показатель увеличивается до 30–40%; при дозе ТМ равной 10 ОДК в группу подвижных соединений переходит от 50 до 70% от валового содержания.

В изучаемых почвах коэффициенты подвижности Pb и Cd как в фоновых почвах, так и в почвах на участках в промышленной части города очень высокие (табл. 5). Подобные значения коэффициентов подвижности Pb и Cd отмечали в эксперименте при 10-кратном превышении допустимого содержания элемента в почвах, когда в группу подвижных соединений переходило от 50 до 70% от валового содержания [23]. Коэффициенты подвижности Cu характерны для незагрязнённых почв, Zn (< 30%) – соответствуют загрязнению ТМ на уровне, не превышающем 1 ОДК.

В почвах промышленной и транспортной зон выявлен высокий (участок № 1) и очень высокий (участки №№ 3 и 4) риск накопления подвижных соединений Pb и Cd (РАС). Особую опасность представляет накопление этих ТМ в рекреационной зоне (участок № 2), в которой риск загрязнения и включения ТМ в пищевые цепи оценивается как очень высокий.

Сопоставив содержание ТМ в снежном покрове и в почве, пришли к выводу, что наибольшее значение коэффициента корреляции Пирсона отмечается между их концентрациями в снежном покрове и валовыми формами ТМ в почве. В промышленной зоне на участках № 3 и № 4 коэффициенты корреляции составляют 0,98 и 0,99 соответственно, на участке

№ 2 (рекреационная зона) – 0,69, что свидетельствует о вкладе выбросов в загрязнение почвенного покрова промышленной зоны города.

Заключение

Таким образом, в северной промышленной части г. Кирова аккумуляция ТМ (особенно Pb) в снежном покрове происходит интенсивнее, чем в других районах города, что обусловлено выбросами предприятий, активным движением грузового транспорта и господствующими направлениями ветров. Наиболее высокое значение суммарного показателя загрязнения снега (за счёт повышенной концентрации Zn) может быть связано с выбросами завода по обработке цветных металлов. В целом, судя по состоянию снежного покрова, уровень загрязнения воздуха Zn, Cu, Pb, Ni, Cd в зимний период в разных функциональных зонах промышленной северной части города и на фоновой территории различается незначительно, но существенно варьирует по годам наблюдений. Выявлена корреляционная связь ($r = 0,98–0,99$) между содержанием ТМ в снежном покрове и их валовым содержанием в почве.

Валовое содержание ТМ во всех изученных почвах не превышало ОДК, максимальное их накопление характерно для участков, расположенных в промышленной зоне (№ 3 и № 4). Оценки состояния почв по показателю суммарного загрязнения существенно различаются в зависимости от выбора фоновых значений. Если в качестве фона рассматриваются ненарушенные почвы дендропарка, то категория загрязнения почв указанных участков промышленной зоны – умеренно-опасная, если учитывать общий региональный фон, то состояние почв удовлетворительное, если ориентироваться на фоновые значения для почв г. Кирова, то полученные данные близки к фоновым.

Концентрации подвижных соединений ТМ в основном не превышают ПДК, однако в промышленной зоне (участки №№ 3 и 4) отмечено повышенное содержание подвижного Zn, а в районе завода по обработке цветных металлов (участок № 4) – двукратное превышение допустимой концентрации Cu. **Высокие значения** K_c Cu, Zn и Cd в промышленной зоне также свидетельствуют о техногенном воздействии. Коэффициенты подвижности (показатели, не зависящие от выбранного фона) позволяют оценить риск накопления в почвах Pb и Cd в обменной и связанной с карбонатами формах в промышленной, а также в рекреационной зонах северной части города как очень высокий.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Admkirov – General characteristics of the industry of the city of Kirov [Internet resource] <https://www.admkirov.ru/administration/economics/industry/> (Accessed: 10.08.2021) (in Russian).
2. Adamovich T.A., Tovstik E.V., Soloveva E.S., Ashikhmina T.Ya., Berezin G.I., Prokashev A.M., Savinykh V.P. Assessment of the state of soils in specially protected natural areas of the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 4. P. 46–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-046-052
3. Motornov K.N. Impact of the industrial complex of the Kirov region on the environment [Internet resource] <https://geoman.ucoz.ru/Sbornik.pdf> (Accessed: 20.12.2021) (in Russian).
4. Olkova A.S., Zimonina N.M., Lyalina E.I., Bobretsova V.R. Diagnostics of local pollution of urbanozem in the areas of petrol stations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-056-062
5. Skugoreva S.G., Fokina A.I., Lyalina E.I., Budina D.V., Zykova Yu.N. Assessment of the state of snow cover in the zone of influence of CHPP-5 in Kirov // *Modern research and development*. 2017. No. 4 (12). P. 481–487 (in Russian).
6. Bezdenezhnykh M.A., Berezin G.I., Zlobin S.S., Ashikhmina T.Ya., Burkov N.A. Assessment of the state of atmospheric air in Kirov by snow cover // *Biological monitoring of natural-technogenic systems*. Kirov: OOO Loban, 2011. P. 129–131 (in Russian).
7. Melnikova A.S., Kondakova L.V. Ecotoxicological assessment of the snow cover of the city of Kirov // *Biological monitoring of natural-technogenic systems*. Kirov: OOO Loban, 2011. P. 27–29 (in Russian).
8. Efremova V.A., Kondakova L.V., Dabakh E.V. Chemical and biological assessment of the state of urban soils // *Siberian Journal of Ecology*. 2013. V. 20. No. 5. P. 741–750 (in Russian).
9. Geography of the Kirov region. Atlas book / Eds. E.A. Kolevatykh, A.M. Prokashev, G.A. Russkikh. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2015. 80 p. (in Russian).
10. Weather in Kirov in September 2021 [Internet resource] <http://weatherarchive.ru/Temperature/Kirov/September-2021#3> (Accessed: 06.06.2022) (in Russian).
11. Kirov weather archive [Internet resource] https://world-weather.ru/archive/russia/kirov_1/ (Accessed: 06.06.2022) (in Russian).
12. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S. Methodological recommendations for assessing the degree of pollution of atmospheric air in settlements with metals according to their content in the snow cover and soil. Moskva: IMGRE, 1990. 15 p. (in Russian).
13. Karpova E.A., Motuzova G.V. Chemical pollution of the biosphere and its environmental consequences. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2013. 304 p. (in Russian).
14. Perin G., Craboledda L., Lucchese M., Cirillo R., Dotta L., Zanetta M.L., Oro A.A. Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination // *Proceedings of the International Conference “Heavy Metals in the Environment”*. Athens: CEP Consultants, 1985. P. 454–456.
15. Shikhova L.N., Egoshina T.L. Heavy metals in soils and plants of the taiga zone of the North-East of European Russia. Kirov: Regional Research Institute of Agriculture N.V. Rudnitskii North-East, 2004. 264 p. (in Russian).
16. Berezin G.I., Kutuyavina T.I., Halimova M.A., Medvedeva N.V. Study of the accumulation of heavy metals in the “soil–plant” system in the urban ecosystem (Kirov) // *Fundamental and applied research: hypotheses, problems, results: Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novosibirsk: Tsentrazvitiya nauchnogo sotrudnichestva, 2017. P. 177–181 (in Russian).
17. 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, 2021. 220 p. (in Russian).
18. Ecological and geochemical soil map of the Kirov region. Sankt-Peterburg: VSEGEI, 1996 (in Russian).
19. Ilyin V.B. On the rationing of heavy metals in soil // *Pochvovedenie*. 1986. No. 9. P. 90–98 (in Russian).
20. Kabata-Pendias A., Pendias X. Trace elements in soils and plants. Moskva: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).
21. Minkina T.M., Motuzova G.V., Nazarenko O.G. Composition of heavy metal compounds in soils. Rostovna-Donu: Izdatelstvo “Everest”, 2009. 208 p. (in Russian).
22. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A. Ecological regulation of the state of soils contaminated with heavy metals // *Agrokhimiya*. 2020. No. 10. P. 79–88 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188120100099
23. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A., Tarasenko I.D., Yakovlev A.S. Evaluation of soil toxicity under conditions of heavy metal pollution // *Pochvovedenie*. 2019. No. 10. P. 1243–1258 (in Russian).

Устойчивость почвенных микромицетов *Trichoderma viride* и *Alternaria alternata* к тяжёлым металлам Cu и Pb

© 2022. Е. В. Федосеева¹, к. б. н., с. н. с., А. П. Кирюшина¹, к. б. н., м. н. с., Д. И. Стом^{2,3}, д. б. н., профессор, В. А. Терехова⁴, д. б. н., профессор,

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, 119071, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33,

²Иркутский государственный университет 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83,

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1,

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,

e-mail: elenfedoseeva@gmail.com, apkiryushina@gmail.com, stomd@mail.ru, vtterekhova@gmail.com

Тяжёлые металлы (ТМ) в почве вызывают изменения в соотношении резистентных и чувствительных видов грибов, механизмы взаимодействия между которыми недостаточно изучены. Цель работы – изучение устойчивости к катионам Cu и Pb и антагонистических свойств двух видов почвенных микромицетов *Alternaria alternata* и *Trichoderma viride*. Устойчивость грибов оценивали по накоплению биомассы, диаметру колоний и интенсивности спороношения. Антагонистическую активность грибов оценивали методом встречных культур. Рассчитанные эффективные концентрации меди и свинца и индексы толерантности грибов позволили заключить, что и *A. alternata*, и *T. viride* являются высоко устойчивыми к Cu и Pb. Обнаружены видовые различия в тест-реакциях: развитие колоний *A. alternata* подавляется в большей степени, чем *T. viride*, однако стимуляция спороношения под воздействием ТМ у альтернрии выражена сильнее по сравнению с быстрорастущей триходермой. Исследуемый штамм *T. viride* оказался конкурентоспособным по отношению к фитопатогенному грибу *A. alternata* как в среде без ТМ, так и в их присутствии. Полученные данные могут быть полезны для прогноза фитопатогенной активности микромицетов на фоне химического загрязнения и динамики накопления того или иного вида грибов в неблагоприятных экологических условиях.

Ключевые слова: токсичность, тяжёлые металлы, *Alternaria*, *Trichoderma*, толерантность, биомасса, скорость роста, спороношение.

Resistance of soil micromycetes *Trichoderma viride* and *Alternaria alternata* to heavy metals Cu and Pb

© 2022. E. V. Fedoseeva¹ ORCID: 0000-0002-4229-7338, A. P. Kiryushina¹ ORCID: 0000-0001-5374-0238, D. I. Stom^{2,3} ORCID: 0000-0001-9496-2961, V. A. Terekhova⁴ ORCID: 0000-0001-9121-639X

¹A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, 33, Leninskiy Prospekt, Moscow, Russia, 119071,

²Irkutsk State University,

1, Karla Marksa St., Irkutsk, Russia, 664003,

³Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontova St., Irkutsk, Russia, 664074,

⁴Lomonosov Moscow State University,

GSP-1, 1-12, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234,

e-mail: elenfedoseeva@gmail.com, apkiryushina@gmail.com,

stomd@mail.ru, vtterekhova@gmail.com

Heavy metals (HM) in the soil cause changes in the ratio of resistant and susceptible fungal species, the mechanisms of interaction between which are not well understood. The aim of this work is to study the resistance to Cu and Pb cations and the antagonistic properties of two species of soil micromycetes *Alternaria alternata* and *Trichoderma viride*. Fungal resistance was assessed by the following test functions: biomass accumulation, colony diameter, and sporulation activ-

ity. The antagonistic activity of fungal species was assessed by competition test. The calculated effective concentrations and tolerance indices made it possible to conclude that *A. alternata* and *T. viride* are highly resistant to the investigated HMs. At the same time, species differences in the patterns of reactions were found. The growth of *A. alternata* colonies was inhibited to a greater extent than *T. viride*, however at the same HM concentration, the stimulation of sporulation in *Alternaria* was more pronounced than in the rapidly growing *Trichoderma*. The studied strain *T. viride* turned out to be quite competitive with respect to the phytopathogenic fungus *A. alternata*, and its antagonistic properties were well pronounced in the medium with HM. The data obtained can be useful for predicting the phytopathogenic activity of micromycetes against the background of chemical pollution and the dynamics of accumulation of various fungal species under adverse environmental conditions.

Keywords: toxicity, heavy metals, *Alternaria*, *Trichoderma*, tolerance, biomass, growth rate, sporulation.

Загрязнение тяжёлыми металлами (ТМ) может оказывать такое влияние на почвенные грибы, которое в итоге способно привести к нарушению биохимических циклов веществ и функционирования почвенных экосистем в целом [1–5]. Многие ТМ накапливаются в почвах в результате промышленной деятельности или чрезмерного использования пестицидов на основе ТМ [6]. Медь присутствует в низких концентрациях в почве и живых организмах [7]. В незагрязнённых почвах концентрация меди колеблется от 20 до 100 мг/кг [8], в агроценозах – от 200 до 1000 мг/кг [7], в почвах промышленных зон может достигать показателей выше 7000 мг/кг [9]. Концентрация свинца в почвах, подверженных промышленному загрязнению, в среднем варьирует от 34 до 348 мг/кг [9] и может достигать показателя 2420 мг/кг [10]. Почвенные микроорганизмы первыми подвергаются токсическому воздействию ТМ в загрязнённых почвах и в ответ способны на формирование устойчивого грибного комплекса [4, 5, 11]. Наибольшее количество изолятов металл-устойчивых грибов было получено из обогащённых Pb сред [12], что, возможно, связано с меньшей токсичностью этого металла для грибов.

Постоянно растущее загрязнение почв ТМ является тревожной ситуацией, что инициирует разработку различных подходов к их детоксикации [2, 6, 11, 13]. Грибы могут играть важную роль в восстановлении экологического качества почвенных экосистем благодаря их высокой устойчивости и различным механизмам адаптации к загрязнению ТМ. Наиболее распространённой группой почвенных грибов являются виды из отдела Ascomycota, обилие которых достигает 80% всей микобиоты [3, 12, 14]. Представители Ascomycota могут представлять собой альтернативу пестицидам и применяться для улучшения качества почв и продовольственных культур [13, 15]. В условиях загрязнения ТМ Ascomycota способны сохранять своё доминирование, претерпевая при этом структурные перестройки. Эти из-

менения вызваны выделением толерантных видов и снижением частоты встречаемости чувствительных видов [16]. В литературе *Aspergillus*, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Penicillium* и *Alternaria* чаще всего упоминаются как металл-устойчивые роды («metal tolerant genera») (табл. 1). Среди устойчивых к ТМ грибов интересны представители рода *Trichoderma*, распространённые в почвах разных агроклиматических зон. Грибы триходерма устойчивы к ряду агрохимикатов, ТМ и органическим загрязняющим веществам (ЗВ), их широко используют в сельском хозяйстве в качестве стимуляторов роста растений и для биологической борьбы с фитопатогенами [4, 15, 17]. Другие металл-устойчивые грибы из родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* и *Alternaria*, наоборот, способны к проявлению фитопатогенных свойств.

Степень устойчивости микромицетов к ТМ определяется разными факторами: условиями биотопа и видовыми особенностями, токсичностью металла и его концентрацией [22]. Поступление катионов ТМ в грибные клетки индуцирует изменения на клеточном и организменном уровнях, что в итоге приводит к изменениям в сообществах. Устойчивость микромицетов проявляется в степени сокращения диаметра и скорости роста колоний, нарушению образования конидий, ингибированию прироста биомассы [4, 6]. Устойчивость к ТМ связана с разнообразными стратегиями адаптации грибов [11, 13, 23, 24]. Недостаточные сведения о реакциях важных в хозяйственном отношении микромицетов на присутствие в среде ТМ, отсутствие представлений об изменениях антагонистических свойств на фоне химического загрязнения почв осложняют понимание механизмов возникновения эпифитотий в агроценозах.

Цель работы – сравнение показателей устойчивости к ТМ (Cu и Pb) и антагонистических свойств двух распространённых видов почвенных микромицетов – *Trichoderma viride* и *Alternaria alternata*.

Таблица 1 / Table 1

Резистентные к металлам почвенные микромицеты и источники выделения
Metal-resistant soil micromycetes and sites of their isolation

Микромицеты Micromycetes	Источники выделения грибов Isolation sites	Ссылки Reference
<i>Aspergillus niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>Penicillium verruculosum</i> , <i>P. citrinum</i>	Почвенные образцы, искусственно загрязнённые Ni, Pb, Cr, Cd / Soil samples artificially contaminated with Ni, Pb, Cr, Cd	[18]
<i>Fusarium</i> , <i>Mortierella</i>	Почвы заброшенных шахт, загрязнённые Pb, Cd, Cu и Zn (Южная Корея) / Soils of abandoned mines contaminated with Pb, Cd, Cu and Zn (South Korea)	[5]
<i>Penicillium</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Umbelopsis</i> , <i>Pochonia</i>	Образцы лесной почвы, искусственно загрязнённые Zn, Fe, Cu, Ni, Cd, Cr (США) / Forest soil samples artificially contaminated with Zn, Fe, Cu, Ni, Cd, Cr (USA)	[12]
<i>Aspergillus</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Geotrichum</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Penicillium</i>	Вода и осадки, загрязнённые городскими сточными водами с Pb, Cr, Cu, Zn, Cd / Water and sediments contaminated by municipal wastewater with Pb, Cr, Cu, Zn, Cd	[19]
<i>Aspergillus niger</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i> , <i>P. janthinellum</i>	Донные отложения реки, загрязнённые ТМ (Малайзия) / River sediments contaminated with HM (Malaysia)	[20]
<i>Acremonium persicinum</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Alternaria chlamydosporigena</i> , <i>Fusarium verticillioides</i>	Почвы из района добычи Pb и Zn (Иран) / Soils from Pb and Zn mining area (Iran)	[21]
<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Mucor</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Rhizopus</i> , <i>Botrytis</i>	Почвы, загрязнённые Fe, Zn, Ni, Cr, Cu, Co, Pb, Cd (Саудовская Аравия) / Soils contaminated with Fe, Zn, Ni, Cr, Cu, Co, Pb, Cd (Saudi Arabia)	[14]

Материалы и методы исследования

Грибные культуры и дизайн эксперимента. Объектами исследования были почвенные штаммы: меланин-продуцирующий фитопатогенный гриб *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl. (1912) и *Trichoderma viride* Pers.:Fr. (1974). Микромицеты инкубировали при 22 °С в колбах с жидкой средой Чапека или в чашках Петри, содержащих агаризованную среду Чапека. В экспериментах на жидких питательных средах суспензию спор вносили в колбы со 100 мл среды Чапека до создания плотности спор 10^5 – 10^6 ед./мл и инкубацию проводили на шейкере. В таких случаях грибная биомасса была представлена мицелиальными пеллетами и не продуцировала споры. На твёрдые среды грибной инокулюм переносили бактериологической петлей из пробирок с маточной культурой, спорообразование учитывали на 4–8 сут.

Тяжёлые металлы. Соли ТМ (сульфат меди и нитрат свинца) добавляли в среды одновременно с внесением грибного инокулюма. Методом кратных разведений создавали градиент

концентраций от 1 до 0,001 г/л в пересчёте на ионы Cu и Pb. Измеряли конечные точки роста грибов (fungal endpoints): биомассу мицелия, диаметр грибной колонии и продуктивность конидий. При выборе катионов металлов и испытываемых концентраций солей ориентировались на публикации об устойчивости грибов к ТМ [12, 20, 21].

Оценка ростовых показателей грибных культур. Биомассу мицелия собирали при фильтровании жидкой культуры на обеззоленные бумажные фильтры. Мицелий высушивали при 103 °С до постоянного веса, взвешивали. Кинетические показатели скорости роста колоний оценивали в чашках Петри по изменению диаметра колоний, который фиксировали с помощью линейки каждые два дня. Этот метод оценки по кинетическим показателям широко используется при анализе структурно-функциональной организации микобиоты в почвах [25]. Интенсивность спороношения рассчитывали по продукции конидий на мм². Для этого вырезали три равных участка агаризованной среды со споро-

носным мицелием от центра к краю колонии микробиологическим сверлом. Вырезанные участки помещали в 5 мл дистиллированной воды с небольшим добавлением детергента (Твин-80), встряхивали, а затем суспензию спор фильтровали через капроновое сито. Интенсивность спороношения рассчитывали с помощью камеры Горяева согласно опубликованным рекомендациям [26]. Контролем служила питательная среда без ТМ.

Оценка антагонистических свойств методом встречных культур. Антагонистическую активность видов грибов, потенциально обладающих супрессорной активностью по отношению к фитопатогенам, оценивали методом встречных культур [27]. Диски, вырезанные с края активно растущей колонии антагониста и патогена, помещали в чашку Петри с агаризованной питательной средой Чапека, учитывали радиус колонии патогена, как обращённый навстречу колонии антагониста (Ra), так и в перпендикулярном (контрольном) направлении (Rc).

Статистическая обработка. Эксперименты проводили в 3–5 повторностях с расчётом средних арифметических и стандартных отклонений, на графиках указывали доверительный интервал. Для расчёта эффективных концентраций – ЭК90, 50, 30, 10 – применяли пробитный анализ. Индекс толерантности (ИТ) грибов рассчитывали по уравнению: ИТ (%) = показатель роста при обработке ТМ / показатель роста без обработки ТМ · 100. Зна-

чения ИТ ранжировали следующим образом [28]: 0,00–0,39 – очень низкая устойчивость к металлу; 0,40–0,59 – низкая металлостойкость; 0,60–0,79 – умеренная металлостойкость; 0,80–0,99 – высокая металлостойкость; 1,00 – очень высокая устойчивость к металлу. Все расчёты проводили в статистических программах R, Excel и ExcelStat.

Результаты и обсуждение

Накопление биомассы. В присутствии в среде роста солей обоих ТМ происходит ингибирование роста грибной биомассы. Соль меди оказывает более выраженный токсический эффект на прирост биомассы *A. alternata*, что можно проследить по величинам ЭК: рассчитанные значения для меди ниже, чем для свинца (табл. 2).

Динамика роста колоний. Исследованные ТМ подавляют развитие грибных колоний (рис. 1). Медь оказывает более выраженный токсический эффект на рост колоний *A. alternata* и *T. viride* (табл. 2). Судя по диаметру колоний, у быстрорастущей триходермы устойчивость к ТМ выше: ЭК50 меди для *A. alternata* на 4-ый день роста – 0,005 г/л, ЭК50 меди для *T. viride* на 4-ый день роста – 0,123 г/л; ЭК50 свинца для *A. alternata* на 4-ый день роста – 0,185 г/л, ЭК50 свинца для *T. viride* на 4-ый день роста – 0,259 г/л.

Интенсивность спороношения зависела от концентрации ТМ: происходило полное

Таблица 2 / Table 2
 Эффективные концентрации (ЭК) Cu и Pb (г/л), отражающие 90, 50, 30 и 10% ингибирование ростовых характеристик *A. alternata* (7 сут) и *T. viride* (4 сут)*
 Effective concentrations (EC) of Cu and Pb (g/L) reflecting 90%, 50%, 30% and 10% inhibition of the growth points of *A. alternata* (7th day) and *T. viride* (4th day)*

ЭК EC	Биомасса Biomass	Диаметр колонии Colony diameter		Интенсивность спороношения Sporulation activity	
	<i>A. alternata</i>	<i>A. alternata</i>	<i>T. viride</i>	<i>A. alternata</i>	<i>T. viride</i>
Cu					
ЭК90 / EC90	0,310	0,097	0,376	0,595	0,191
ЭК50 / EC50	0,046	0,005	0,123	0,316	0,054
ЭК30 / EC30	0,021	0,002	0,078	0,245	0,032
ЭК10 / EC10	0,007	0,0003	0,040	0,168	0,015
Pb					
ЭК90 / EC90	0,523	0,569	0,781	0,696	0,828
ЭК50 / EC50	0,148	0,240	0,259	0,447	0,342
ЭК30 / EC30	0,088	0,169	0,166	0,374	0,239
ЭК10 / EC10	0,042	0,101	0,086	0,287	0,141

Примечание: * – разная длительность экспозиции обусловлена тем, что *A. alternata* и *T. viride* отличаются скоростью роста колоний.
 Note: * – different duration of exposure is due to the fact that *A. alternata* and *T. viride* differ in the rate of colony growth.

ингибирование при более высоких концентрациях (1 г/л) и стимулирование при меньших (0,2–0,01 г/л) (рис. 2). Как и при анализе скорости роста колоний, ЭЖ меди оказались ниже ЭЖ свинца (табл. 2). Интересно, что интенсивность спороношения стимулируется ТМ выше у альтернарии, чем у триходермы, что отражает, очевидно, различия жизненных стратегий этих двух видов. В норме обильного спорообразования быстрорастущей триходермы (*r*-стратег) достаточно для занятия новых ниш и не столь критично в условиях загрязнения ТМ. Для альтернарии, не выделяющейся высокой скоростью роста с менее интенсивным спорообразованием (типичные признаки *K*-стратегов), для успешного выживания и освоения новых ниш в неблагоприятных условиях требуется большая активация образования конидий.

Антагонистические свойства. При оценке антагонизма в стандартной среде Чапека триходерма не проявляла ингибирующей активности по отношению к альтернарии ни в контроле,

ни в вариантах с ТМ (рис. 3а, б, см. цв. вкладку IV). Однако на фоне добавленного в среду гуминового препарата (0,1 г/л лигногумата) триходерма оказалась конкурентноспособной: «контрольный» радиус (*R*_a) роста альтернарии был значительно меньше радиуса в направлении триходермы (рис. 3в, см. цв. вкладку IV). На 3-ый день роста средний *R*_a *A. alternata* составлял 15,3±0,6 мм, а *R*_a *T. viride* – 21,3±0,9 мм.

Каждый из ростовых показателей (биомасса, диаметр колоний, продукция спор) информативен для оценки устойчивости к ТМ. Однако для объективного заключения о степени устойчивости микромицетов к загрязнению и дальнейшего прогноза динамики экспансии вида в условиях техногенной нагрузки необходимо учитывать их в комплексе.

Для сравнения степени устойчивости исследованных грибов нами привлечены данные исследований, характеризующие устойчивость других микромицетов (табл. 4).

Расчёт ИТ грибов представляется удобным инструментом сравнения их степени

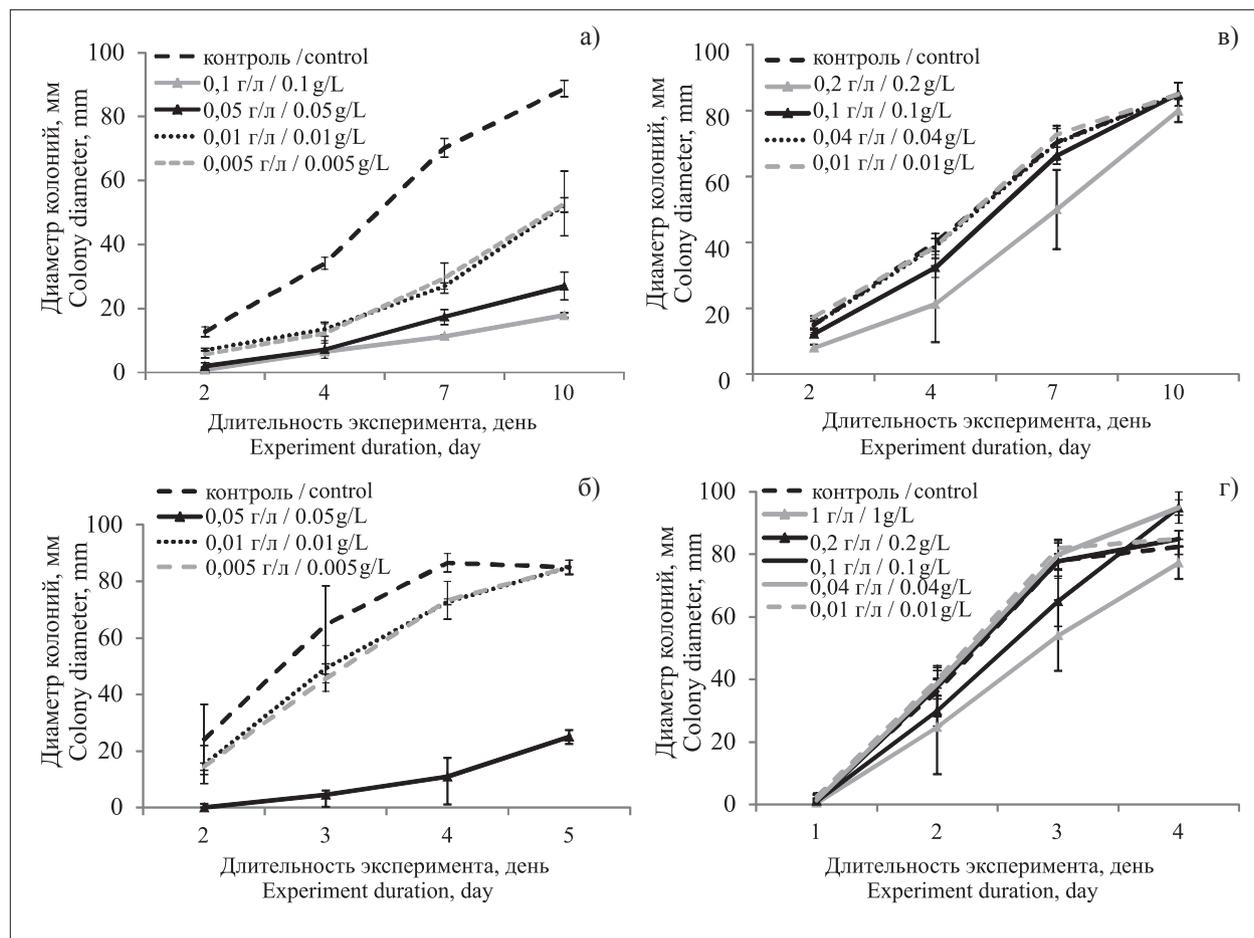


Рис. 1. Динамика роста колоний грибов *A. alternata* в присутствии катионов: а) Cu, в) Pb; *T. viride* в присутствии катионов б) Cu, г) Pb
Fig. 1. Growth dynamics of fungal colonies *A. alternata* in the presence of cations: а) Cu, в) Pb; *T. viride* in the presence of cations б) Cu, г) Pb

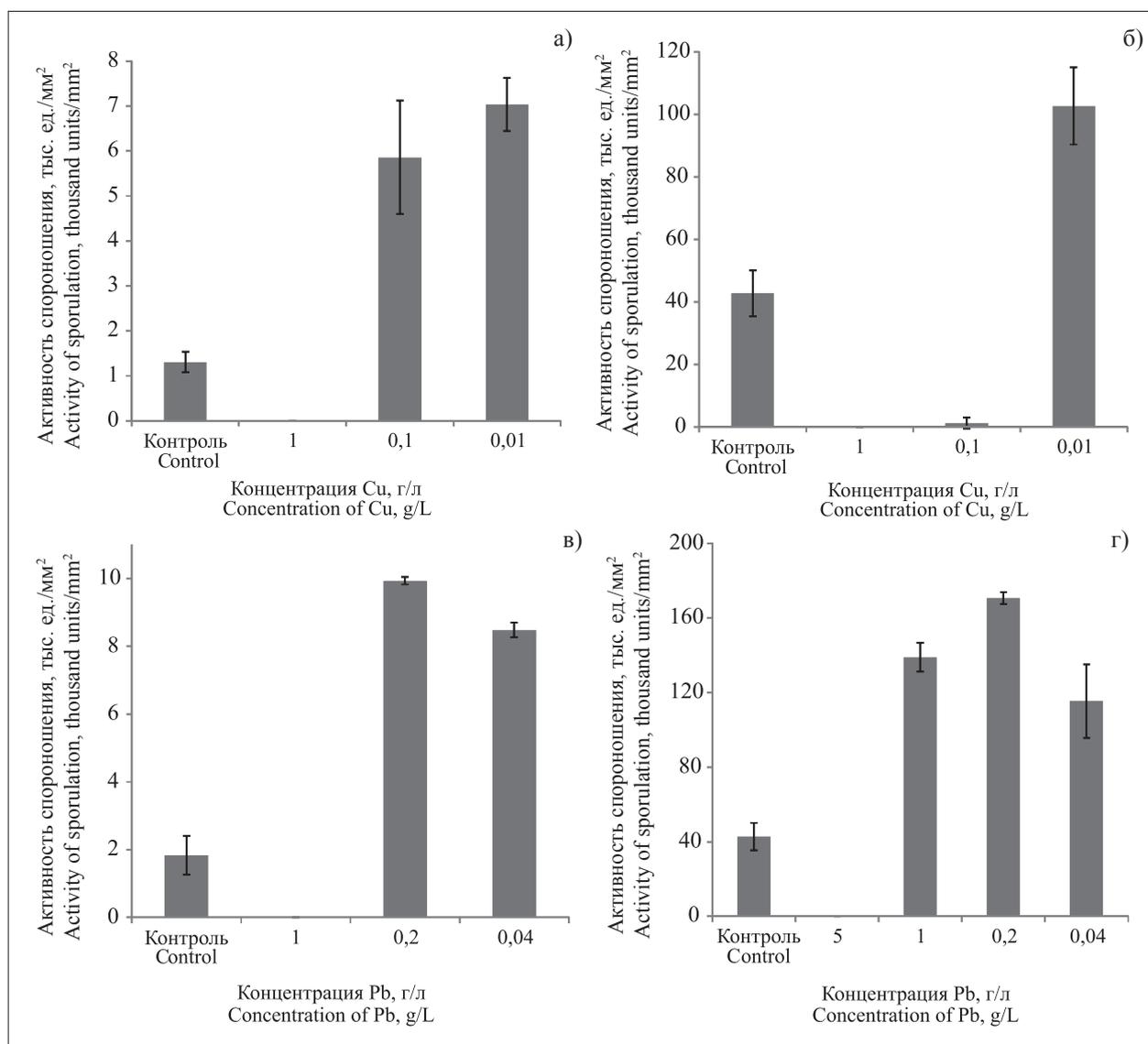


Рис. 2. Интенсивность спороношения грибов *A. alternata* в присутствии катионов:

а) Cu, в) Pb; *T. viride* в присутствии катионов б) Cu, г) Pb
Fig. 2. Intensity of fungal sporulation *A. alternata* in the presence of cations:
 а) Cu, в) Pb; *T. viride* in the presence of cations б) Cu, г) Pb

Таблица 3 / Table 3

Индексы толерантности (ИТ) грибов *A. alternata* (7 сут) и *T. viride* (4 сут)*
 к катионам Cu и Pb на основании оценки ростовых показателей
 Tolerance indices (IT) of *A. alternata* (7th day) and *T. viride* (4th day)*
 to Cu and Pb cations based on the assessment of growth points

ИТ IT	Диаметр колонии Colony diameter		Интенсивность спороношения Sporulation activity	
	<i>A. alternata</i>	<i>T. viride</i>	<i>A. alternata</i>	<i>T. viride</i>
Cu				
0,1 г/л / g/L	0,161	0,212	4,488	0,028
0,01 г/л / g/L	0,384	0,840	5,390	2,401
Pb				
0,1 г/л / g/L	0,941	1,032	5,409	3,992
0,01 г/л / g/L	1,032	1,032	4,619	2,699

Примечание: * – см. таблицу 1 / Note: * – see Table 1.

Таблица 4 / Table 4

Индексы толерантности (ИТ) наиболее устойчивых микроорганизмов
Tolerance indices (IT) of the most resistant microorganisms

Вид/штамм Species/strain	Сайт выделения Isolation site	ТМ HM	Концентрация Concentration	Тест-реакция Test-reaction	Значение ИТ IT value	Ссылка References
<i>Trichoderma citrinoviridae</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Pb	200 мг/л 200 mg/L	рост колоний colony growth	1	[6]
<i>T. reesei</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Pb	200 мг/л 200 mg/L	рост колоний colony growth	0,5	[6]
<i>T. ghanense</i>	почвы с рудников soil from mines	Pb	100–400 мг/кг 100–400 mg/kg	рост колоний colony growth	1,20–1,27	[28]
<i>T. citrinoviridae</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Cu	100 мг/л 100 mg/L	рост колоний colony growth	0,65	[6]
<i>T. reesei</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Cu	100 мг/л 100 mg/L	рост колоний colony growth	0,65	[6]
<i>T. ghanense</i>	почвы с рудников soil from mines	Cu	125–1000 мг/кг 125–1000 mg/kg	рост колоний colony growth	1,25–1,27	[28]
<i>T. asperellum</i>	лук onion	Pb	100 мг/л 100 mg/L	накопление биомассы biomass accumulation	0,83	[4]
<i>T. asperellum</i>	лук onion	Pb	–	интенсивность спорношения sporulation intensity	0,55	[4]
<i>Fusarium. fujikuroi</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Pb	200 мг/л 200 mg/L	рост колоний colony growth	0,65	[6]
<i>F. solani</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Pb	200 мг/л 200 mg/L	рост колоний colony growth	0,75	[6]
<i>F. fujikuroi</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Cu	100 мг/л 100 mg/L	рост колоний colony growth	0,78	[6]
<i>F. solani</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Cu	100 мг/л 100 mg/L	рост колоний colony growth	0,9	[6]
<i>Penicillium simplicissimum</i>	загрязнённые ТМ донные осадки sediments contaminated with HM	Pb	100–5000 мг/л 100–5000 mg/L	рост колоний colony growth	толерантен во всём диапазоне, кроме 1000 и 5000 мг/л (IT = 0,15 и 0) tolerant over the entire range except 1000 and 5000 mg/L (IT = 0.15 and 0)	[20]

<i>P. simplicissimum</i>	загрязнённые ТМ донные осадки sediments contaminated with HM	Cu	100–1000 мг/л 100–1000 mg/L	рост колоний colony growth	толерантен во всём диапазоне, кроме 1000 мг/л (IT = 0,08) tolerant over the entire range except 1000 mg/L (IT = 0.08)	[20]
<i>Aspergillus niger</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Pb	200 мг/л 200 mg/L	рост колоний colony growth	0,25	[6]
<i>A. niger</i>	загрязнённые ТМ донные осадки sediments contaminated with HM	Pb	100–5000 мг/л 100–5000 mg/L	рост колоний colony growth	толерантен во всём диапазоне, кроме 5000 мг/л (IT = 0,61) tolerant over the entire range except 5000 mg/L (IT = 0.61)	[20]
<i>A. niger</i>	загрязнённая ТМ почва soil contaminated with HM	Cu	100 мг/л 100 mg/L	рост колоний colony growth	0,3	[6]
<i>A. niger</i>	загрязнённые ТМ донные осадки sediments contaminated with HM	Cu	100–1000 мг/л 100–1000 mg/L	рост колоний colony growth	толерантен во всём диапазоне, кроме 1000 мг/л (IT = 0,36) tolerant over the entire range except 1000 mg/L (IT = 0.36)	[20]

резистентности к ЗВ [28]. Значения ИТ больше единицы указывают на устойчивый или толерантный характер грибов, а значения ИТ ниже единицы – чувствительный или нетолерантный характер грибов к определённому ТМ и его концентрации [28]. Исходя из степени сокращения диаметра колоний, *T. viride* можно отнести к грибам с высокой металлостойкостью (ИТ при 0,01 г/л ТМ от 0,840), а *A. alternata* – к грибам с умеренной металлостойкостью (ИТ при 0,01 г/л ТМ от 0,384) (табл. 3).

Исходя из ИТ по изменению активности спороношения, оба штамма характеризуются как высоко устойчивые. При этом ИТ тёмно-окрашенного штамма выше, что может быть обусловлено наличием меланина в клеточной стенке спор, придающего им большую устойчивость, а также более высокой стимуляцией спороношения *A. alternata* в присутствии ТМ. Сравнивая эффекты двух исследованных катионов ТМ, можно заключить, что свинец проявлял меньшую токсичность по отношению к обоим видам грибов.

Обсуждение устойчивости триходермы к ТМ важно в контексте её полезной роли в агроценозах. Известна роль *Trichoderma* в стимулировании роста растений, в качестве агента биоконтроля в сельском хозяйстве и как биоремедианта почв [15, 17]. Интересно, что изучаемый штамм *T. viride* оказался конкурентным к штамму фитопатогенного гриба *A. alternata* даже на средах с внесением с ТМ и обогащённых гуминовыми веществами.

Заключение

Проанализированный набор ростовых показателей (накопление биомассы, диаметр колоний и продукция спор), а также рассчитанные на их основе индексы – ИТ и ЭЖ – позволили сделать вывод об общей высокой устойчивости *A. alternata* и *T. viride* к Cu и Pb. При этом видовые особенности (быстрый рост колоний триходермы и наличие меланина в спорах альтернативии) оказывают влияние на степень подавления ростовых показателей и характер устойчивости к ТМ. Эти данные могут быть полезны при прогнозировании динамики развития грибных сообществ в загрязнённых агроценозах.

Авторы благодарят к. б. н. А. Е. Иванову за предоставление грибов из коллекции кафедры биологии почв факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова.

Исследование выполнено за счёт гранта Российской государственной академии наук № 22-24-00799, <https://rscf.ru/project/22-24-00799/>.

References

1. Marfenina O.E. Anthropogenic ecology of soil fungi. Moskva: Medicine for everyone, 2005. 195 p. (in Russian).
2. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Sheshegova T.K. Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 102–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109
3. Lin Y., Yea Y., Hua Y., Shia H. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019. V. 180. P. 557–564. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.057
4. Pérez-Torres E.J., Camacho-Luna V., Pérez-Ocampo S., Rodríguez-Monroy M., Sepúlveda-Jiménez G. Tolerance to oxidative stress caused by copper (Cu) in *Trichoderma asperellum* To // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020. V. 29. Article No. 101783. doi: 10.1016/j.bcab.2020.101783
5. Chun S.-J., Kim Y.-J., Cui Y., Nam K.-H. Ecological network analysis reveals distinctive microbial modules associated with heavy metal contamination of abandoned mine soils in Korea // Environmental Pollution. 2021. V. 289. Article No. 117851. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117851
6. Liaquat F., Haroon U., Hussain Munis M.F., Arif S., Khizar M., Ali W., Shengquan C., Qunlu L. Efficient recovery of metal tolerant fungi from the soil of industrial area and determination of their biosorption capacity // Environmental Technology & Innovation. 2020. V. 21. Article No. 101237. doi: 10.1016/j.eti.2020.101237
7. He M., Shi H., Zhao X.Y. Immobilization of Pb and Cd in contaminated soil using nano-crystallite hydroxyapatite // Procedia Environ. Sci. 2013. No. 18. P. 657–665. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.090
8. Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety // Environ. Int. 2016. V. 88. P. 299–309. doi: 10.1016/j.envint.2015.12.017
9. Trifonova T.A., Podolets A.A., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podolets A.A. Assessment of soil contamination in the recreational areas of the city by the industrial compounds of heavy metals and arsenic // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 94–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-094-101/1
10. Pasqualetti M., Mulas B., Canzonetti G., Benedetti A., Tempesta S. Effects of long-term heavy metal contamination on soil fungi in the Mediterranean area // Cryptogamie, Mycologie. 2012. V. 33. No. 1. P. 43–57. doi: 10.7872/crym.v33.iss1.2012.043
11. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // Theoretical and

- Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 14–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031
12. Torres-Cruz T.J., Hesse C., Kuske C.R., Porrás-Alfaro A. Presence and distribution of heavy metal tolerant fungi in surface soils of a temperate pine forest // Applied Soil Ecology. 2018. V. 131. P. 66–74. doi: 10.1016/j.apsoil.2018.08.001
13. Domracheva L.I., Fokina A.I., Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya. Two sides of soil fungi of the genus *Fusarium* and their metabolites: danger to biota and the possibility of use in biotechnology (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 6–15. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-006-015
14. Alsabhan A.H., Perveen K., Alwadi A.S. Heavy metal content and microbial population in the soil of Riyadh Region, Saudi Arabia // Journal of King Saud University – Science. 2022. V. 34. Article No. 101671. doi: 10.1016/j.jksus.2021.101671
15. Kalinin A.A., Davidyuk D.S., Bokov N.A., Abubakirova R.I., Shirokikh A.A. Effect of the new biological product created on the basis of *Trichoderma* on soil microorganisms and plants of different taxons // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 115–121 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-115-121
16. Singh S., Kang S.H., Mulchandani A., Chen W. Bioremediation: environmental clean-up through pathway engineering // Curr. Opin. Biotechnol. 2008. V. 19. No. 5. P. 437–444. doi: 10.1016/j.copbio.2008.07.012
17. Gorai P.S., Barman S., Gond S.K., Manda N.C. *Trichoderma* // Beneficial Microbes in Agro-Ecology. 2020. Ch. 28. P. 571–591. doi: 10.1016/B978-0-12-823414-3.00028-9
18. Njoku K.L., Asunmo M.O., Ude E.O., Adesuyi A.A., Oyelami A.O. The molecular study of microbial and functional diversity of resistant microbes in heavy metal contaminated soil // Environmental Technology & Innovation. 2020. V. 17. Article No. 100606. doi: 10.1016/j.eti.2020.100606
19. Ezzouhri L., Castro E., Moya M., Espinola F., Lairini K. Heavy metal tolerance of filamentous fungi isolated from polluted sites in Tangier, Morocco // Afr. J. Microbiol. Res. 2009. V. 3. No. 2. P. 35–48. doi: 10.5897/AJMR.9000354
20. Iskandar N.L., Izzati Mohd Zainudin N.A., Tan S.G. Tolerance and biosorption of copper (Cu) and lead (Pb) by filamentous fungi isolated from a freshwater ecosystem // Journal of Environmental Sciences. 2011. V. 23. No. 5. P. 824–830. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60475-5
21. Mohammadian E., Babai Ahari A., Arzanlou M., Oustan S., Hossein Khazaei S. Tolerance to heavy metals in filamentous fungi isolated from contaminated mining soils in the Zanjan Province, Iran // Chemosphere. 2017. V. 185. P. 290–296. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.022
22. Ruta L., Paraschivescu C., Matache M., Avramescu S., Farcasanu I.C. Removing heavy metals from synthetic effluents using “kamikaze” *Saccharomyces cerevisiae* cells // Appl Microbiol Biotechnol. 2010. V. 85. P. 763–771. doi: 10.1007/s00253-009-2266-3
23. Fomina M., Gadd G.M. Biosorption: current perspectives on concept, definition and application // Bioresour. Technol. 2014. V. 160. P. 3–14. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.102
24. Korneykova M.V., Lebedeva E.V. Opportunistic fungi in the polluted soils of Kola Peninsula // Geography, Environment, Sustainability. 2018. V. 11. No. 2. P. 125–137. doi: 10.24057/2071-9388-2018-11-2-125-137
25. Netrusov A.I., Bonch-Osmolovskaya E., Gorlenko V.M., Ivanov M.V., Karavaiko G.I., Kozhevnikov P.A., Kolotilova N.N., Kotova I.B., Maksimov V.N., Nozhevnikova A.N., Semenov A.M., Turova T.P., Yudina T.G. Ecology of microorganisms. Moskva: Yurayt, 2013. 268 p. (in Russian).
26. Sanin S.S., Neklesa N.P., Sanina A.A., Pacholko E.V. Methodical recommendations on creation of infectious backgrounds for immunogenetic studies of wheat. Moskva: Russian Research Institute of Phytopathology, 2008. 68 p. (in Russian).
27. Matarese F., Sarrocco S., Gruber S., Seidl-Seiboth V., Vannacci G. Biocontrol of *Fusarium* head blight: interactions between *Trichoderma* and mycotoxigenic *Fusarium* // Microbiology. 2012. V. 158. No. 1. P. 98–106. doi: 10.1099/mic.0.052639-0
28. Oladipo O.G., Awotoye O.O., Olayinka A., Bezuidenhout C.C., Maboeta M.S. Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites // Brazilian Journal of Microbiology. 2018. V. 49. No. 1. P. 29–37. doi: 10.1016/j.bjm.2017.06.003

Снижение геохимических техногенных потоков при разработке полиминерального месторождения Дальневосточного региона

© 2022. Н. П. Хрунина, к. т. н., в. н. с.,

А. Ю. Чебан, к. т. н., в. н. с.,

Институт горного дела Дальневосточного отделения

Российской академии наук,

680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51,

e-mail: npetx@mail.ru

Оксиды тяжёлых металлов потенциально высоко реакционноспособны и приводят к прямому повреждению ДНК, цитотоксичны, снижают жизнеспособность клеток организма. Для обеспечения экологической безопасности последствий, сопровождающих процессы переработки золотоносных песков месторождения, проведены исследования микроэлементного, фазового и гранулометрического состава пород. Установлены преобладающие по массе элементы: фосфор, лантан, церий, неодим, барий, цирконий, хром, стронций, а также глинистые минералы, затрудняющие процесс выделения ценных компонентов. Выявленная совокупность минеральных компонентов обладает высокой миграционной способностью и токсичностью.

Разработана технология, сокращающая операции выщелачивания и гидрометаллургической переработки. Комплекс средств позволяет эффективно выделить ценные компоненты посредством гидродинамического и кавитационного воздействия на глинистую составляющую. В результате реализации технологии значительно сократятся потоки рассеивания и последующие геохимические аномалии, затраты на контроль остаточных концентраций сильных полиэлектролитов и систематическую токсикологическую оценку. Разработанная технология включает новые установки, обеспечивающие разрушение глинистой составляющей посредством ультразвукового и кавитационного воздействия, гидроакустических эффектов или гидродинамических, например, с помощью таких установок, как гидродинамические кавитаторы с низкой ёмкостью потребления энергии, на минеральную составляющую гидросмеси с исключением реагентного разупрочнения.

Ключевые слова: токсичность, микроанализ, дисперсность, гидродинамическая активация, кавитация.

Reduction of technogenic geochemical fluxes during the operation of a polymineral deposit in the Far Eastern Region

© 2022. N. P. Khrunina ORCID: 0000-0001-8117-0922[†]

A. Yu. Cheban ORCID: 0000-0003-2707-626X[†]

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

51, Turgeneva St., Khabarovsk, Russia, 680000,

e-mail: npetx@mail.ru

Heavy metal oxides are potentially highly reactionary capable and cytotoxic. They cause direct DNA damage and decrease viability of the cells of a living organism. To ensure environmental safety impacts that accompany processing gold-bearing sands deposits, studies of microelement, phase and grain-size composition of rocks have been carried out. There are established elements prevailing by mass: phosphorus, lanthanum, cerium, neodymium, barium, zirconium, chromium, strontium, as well as clay minerals, complicating the process of selecting valuable components. The revealed combination of mineral components has a high migration ability and toxicity.

It is developed the technology reducing operations of leaching and hydrometallurgical processing. The complex of tools allows you to effectively select valuable components by hydrodynamic and cavitation impact on the clay component. As a result of the implementation of the technology, dispersion fluxes and subsequent geochemical anomalies, the costs of monitoring residual concentrations of strong polyelectrolytes and systematic toxicological assessment will be significantly reduced. The developed technology includes new installations that ensure the destruction of the clay component through ultrasonic and cavitation, hydroacoustic or hydrodynamic effects.

Keywords: toxicity, dispersibility, microanalysis, hydrodynamic activation, cavitation.

В связи с многообразием геологических условий формирования золотоносных месторождений Дальневосточного (ДВ) региона выделяются различные промышленно-генетические типы, характеризующиеся не только особенностями строения, но и содержанием основных и попутных компонентов с низкой степенью гипергенной устойчивости. В настоящее время в эксплуатацию вовлекаются новые типы комплексных месторождений рудно-россыпного типа, содержащие значительную долю ценных компонентов мелких фракций с низкой физико-механической и гидродинамической устойчивостью. Результатом этого являются экологические проблемы, связанные с образованием техногенных массивов – геологических тел техногенного происхождения, представленных вскрышными, вмещающими породами, отходами обогащения. При существующих в настоящее время методиках извлечения попутных элементов значительная часть этих элементов уходит в отвалы, удаляется с промышленными стоками. Будучи освобождёнными из кристаллических решёток, изоморфные примеси начинают самостоятельную миграцию в биосфере. Поэтому в районах обогатительных фабрик почва, вода, растения имеют повышенные концентрации многих элементов, не извлекаемых из руд [1–8]. Наличие повышенных содержаний тяжёлых элементов, образующих при переработке горной массы высокотоксичные и высоко активные соединения, создаёт предпосылки к активизации геохимических техногенных потоков и связанному с ними химическому загрязнению почвы и различных водных объектов токсичными элементами. В соответствии с проведёнными исследованиями [9–11] была установлена связь между уровнем тяжёлых металлов (ТМ) в организме человека и частотой возникновения различных заболеваний, в том числе анемии. Также установлено, что оксиды ТМ потенциально высоко реакционноспособны и приводят к прямому повреждению ДНК, цитотоксичны, снижают жизнеспособность клеток организма. Всё это может быть обусловлено не только аномальностью природных зон, но и общей экологической обстановкой в районах добычи полезных ископаемых, спровоцированной геохимическими техногенными потоками.

Требования по повышению полноты извлечения полезных ископаемых из недр и снижению экологической нагрузки на природную среду ставит перед исследователями важную комплексную задачу, решение которой позво-

лит на стадии выемки и переработки горной массы осуществить разрушение минеральной составляющей с минимальным уровнем потерь ценных компонентов и снижением загрязнения окружающей среды. Значительную роль в решении этой проблемы может сыграть развитие эффективных и безопасных процессов, основанных на новых физических принципах воздействия на пески и их гидросмеси [12–14], а также – сокращение использования полиэлектролитных комплексов для разрушения глинистой составляющей и выделения минеральных компонентов в процессе выщелачивания.

В настоящее время требуется более детальное изучение золотоносных месторождений региона, в том числе исследование изменения состояния вмещающих пород при водонасыщении, играющем значительную роль в разрушении структурных связей между частицами и агрегатами при дезинтеграции и последующем выделении минеральных компонентов. Расширяется диапазон исследуемых объектов по изучению динамики изменения упругих характеристик при водонасыщении, которая может оказывать существенное влияние на эффективность процесса дезинтеграции. Характерным объектом является один из участков Фадеевского рудно-россыпного узла, глинистые отложения которого содержат химически активные элементы.

Для прогнозирования процессов ресурсосбережения и снижения геохимического загрязнения при переработке высокоглинистых песков первостепенное значение приобретает исследование минерального состава глинистой составляющей.

Целью настоящей работы является обеспечение экологической безопасности переработки песков комплексного полиминерального месторождения посредством совершенствования процесса дезинтеграции на основе физико-механического комплексного воздействия и сокращения операций обогащения с использованием полиэлектролитов для снижения геохимических техногенных потоков.

Методы исследования

Методы исследования включали спектротрический, рентгеноструктурный и энергодисперсионный микроанализ. Изучали элементный, фазовый и гранулометрический состав пород для обоснования рекомендаций по разработке одного из участков Фадеевского рудно-россыпного узла, расположенного

в юго-западной части Приморского края. Спектрометрический анализ выполнялся на рентгенофлюоресцентном анализаторе Mobilab X-50 (Innov-Systems Inc., США). Фазовый анализ проб проводили с помощью дифрактометра ДРОН-7, напряжение трубки – 40кВ, ток накала – 20μА, шаг сканирования по углу 2Theta – 0,05 град. Для идентификации линий рентгеновских спектров использовали программный пакет PDWin (НПП «Буревестник»). С помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6000 PLUS NEOSCOPE (JEOL, Япония) осуществляли энергодисперсионный микроанализ образцов пород. Гранулометрический анализ проб проводили стандартными методами.

Результаты и обсуждение

Спектрометрический анализ пород комплексного полиминерального месторождения Фадеевского рудно-россыпного узла показал преобладание по массе соединений Fe (6,2%), K (≈2%), Ca (1,2%), Ti (0,5%), Ba, Zr, Cr, Sr, Cu, Zn, Rb, W. Энергодисперсионным анализом установлено присутствие микроэлементов широкого спектра благородных, в том числе золота Au, серебра Ag, платины Pt, редкоземельных и других элементов: Ce, La, Os, Eu, Gd, Nd, Sm, Tb, In, Dy, Th, Tm, Yb, Lu, Fe, Ca, K, P, Si, Al, Mg, Hg, O, C (рис. 1, 2). Преобладающими по массе являются элементы: фосфор, лантан, церий, неодим и др. В изоморфной примеси к цирконию могут находиться иттрий, тяжёлые лантаноиды и др. Потенциальные возможности изоморфных примесей, как источника многих химических элементов, чрезвычайно велики.

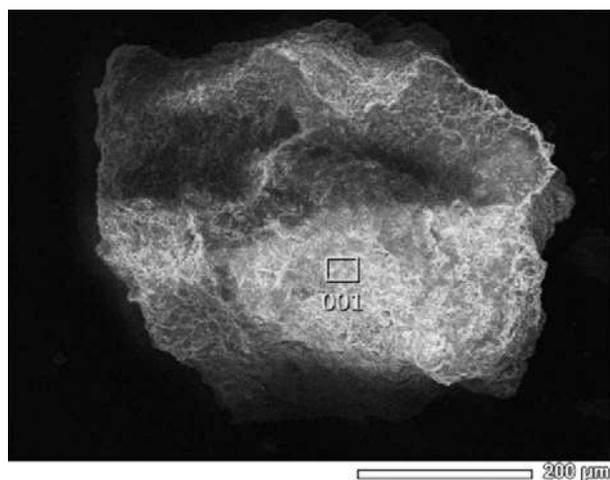


Рис. 1. Изображение сканируемой поверхности образца
Fig. 1. The image of the scanned sample surface

В пробах исследуемого участка месторождения рентгеноструктурным анализом установлены минералы: альбит, кальциан $(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$, мусковит $H_2KAl_3Si_3O_{12}$, кварц SiO_2 , якобит $Mn_{0,98}Mg_{0,006}Fe_{2,009}O_4$, нонтронит $Na_{0,3}Fe_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$; герасимовскит $NbTi(OH)_9$; киляншанит $NaH_4(VO_3)(CO_3) \cdot 2H_2O$; лайт $2K_2O \cdot 3MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 24SiO_2 \cdot 12H_2O$, тажеранит $(Zr,Ca,Ti)O_2$. Нонтронит – минерал из группы монтмориллонита. Большая часть глинистых минералов обладает высокой миграционной способностью, особенно, мусковит. Мусковит содержит в примесях Mn, Cr, Ba, Fe, Mg. Кроме глинистых минералов, присутствует также алмадин, который в примесях содержит $K_2O, Na_2O, P_2O_5, V_2O_5, ZrO_2, BeO$ и др. Гранулометрический анализ проб показал существенное преобладание фракций – 0,5 мм.

В процессе переработки минеральная составляющая песков подвергается частичному измельчению, разрушению, освобождению от глинистых частиц. Резко изменяются форма и структурные связи пород разного гранулометрического состава вследствие дробления, истирания, промывания. При этом суммарная поверхность минералов с низкой степенью гипергенной устойчивости резко увеличивается, возрастает их поверхностная активность. Повышение полноты извлечения минералов, в том числе с токсичными элементами, а также низкой степенью физико-механической, химической и гидроаэродинамической устойчивостью, ведёт к снижению техногенного загрязнения территории.

Анализ технологических возможностей золотодобывающих предприятий показал, что применяемые технические средства не

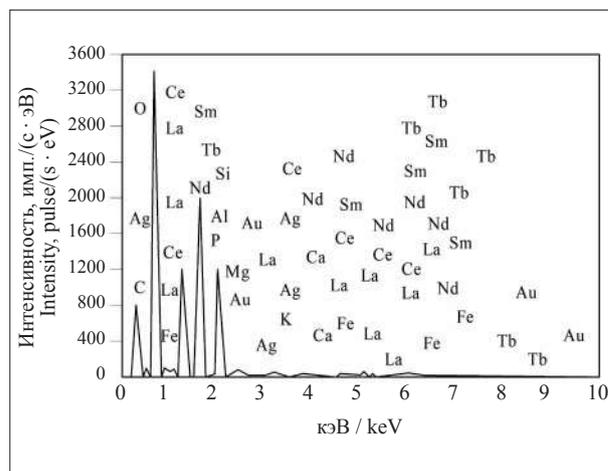


Рис. 2. Спектрограмма микроэлементов исследуемого образца
Fig. 2. Spectrogram of microelements of the sample

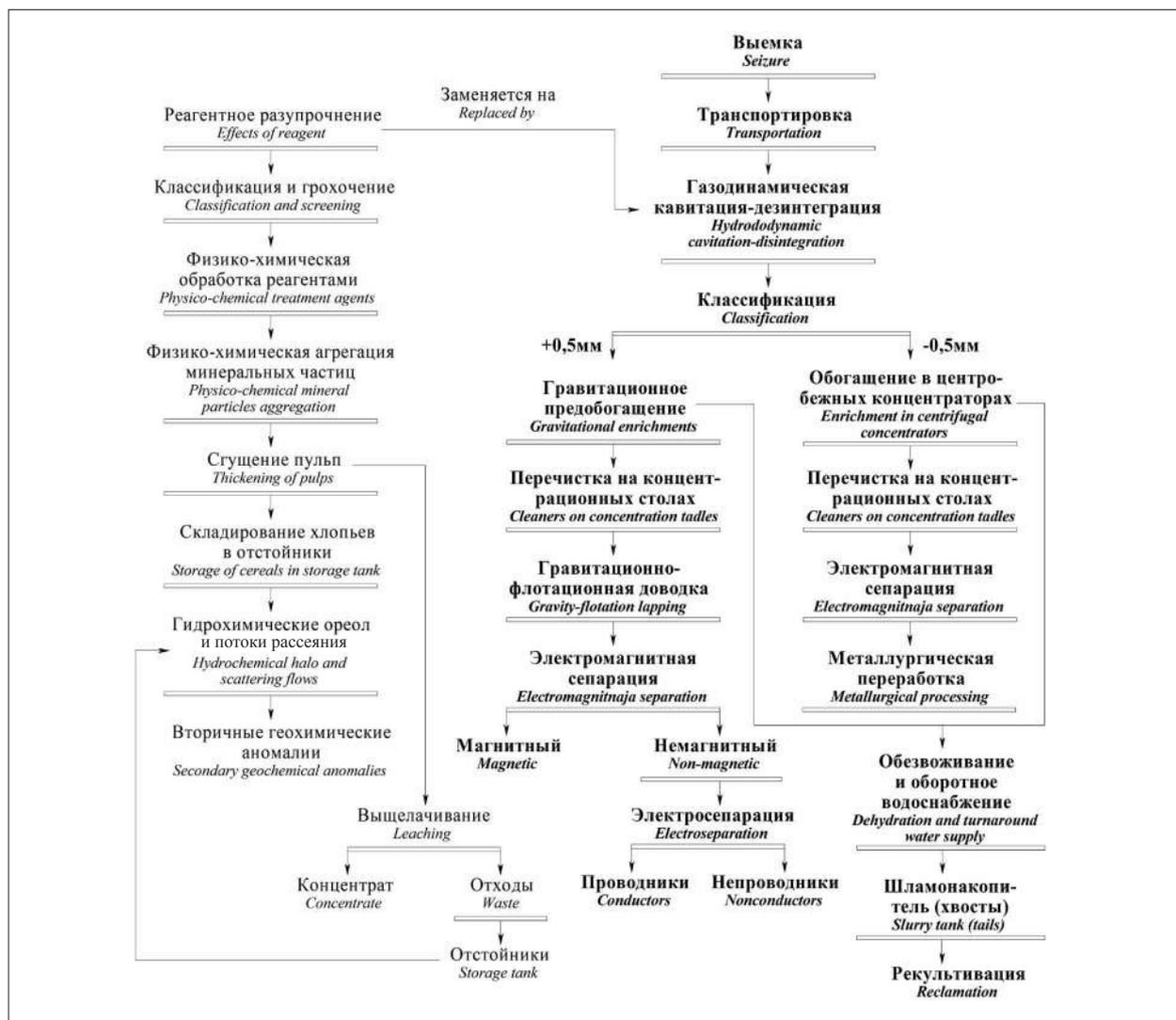


Рис. 3. Технологическая схема добычи и переработки минерального сырья. Традиционная технологическая схема включает выемку, транспортировку и далее по схеме последовательность операций, изображённая тонкими линиями
Fig. 3. Technological scheme of mineral extraction and processing. The traditional technological scheme includes notching, transporting and further along the pattern of the sequence of operations, depicted by thin lines

обеспечивают эффективную дезинтеграцию и экологическую безопасность при переработке высокоглинистых песков для извлечения частиц золота и других ценных компонентов мелких и тонких классов. Известная технология на основе физико-химической подготовки глинистых металлоносных песков россыпных месторождений обеспечивает активизацию дезинтеграции, но является экологически небезопасной, так как включает реагентное разрушение глинистого цемента песков при механическом, гидравлическом рыхлении и фильтрационно-дренажном увлажнении. Технология включает также механическое и гидравлическое разрушение цементированных глиной песков при обработке их реагентными добавками, классификацию и

грохочение, физико-химическую обработку взвешенных массопотоков растворами реагентов, физико-химическую агрегацию минеральных частиц и гравитационное осаждение флокул в технологической воде, предварительное сгущение и обезвоживание пульп, складирование хлопьев в выработанное пространство и отстойники [15]. Развитие процесса дезинтеграции гидродинамическими и другими физическими методами позволит исключить операцию реагентного разрушения глинистых металлоносных песков, сведёт к минимуму процессы выщелачивания в массиве, тем самым сократит дополнительную нагрузку на окружающую среду.

Предлагаемая схема разработки. Схема разработки по извлечению тонких и мелких

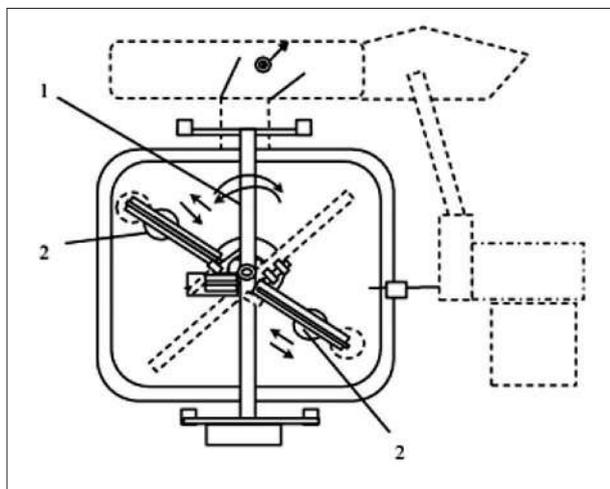


Рис. 4. Геотехнологический комплекс для разработки высокоглинистого полиминерального месторождения: 1 – передвижная эстакада; 2 – гидродинамический дезинтегратор

Fig. 4. Geotechnological complex for the exploitation of highly clay polymineral deposit: 1 – mobile rack; 2 – hydrodynamic disintegrator

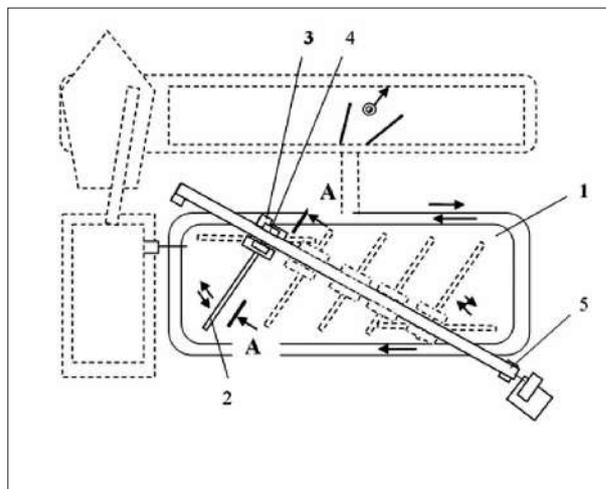


Рис. 5. Геотехнологический комплекс для разработки высокоглинистого полиминерального месторождения: 1 – модуль дезинтеграции; 2 – модуль ультразвукового излучения; 3 – подвижная каретка; 4 – привод перемещения каретки; 5 – поперечина эстакады

Fig. 5. Geotechnological complex for the exploitation of highly clay polymineral deposit: 1 – disintegration module; 2 – module of ultrasonic radiation; 3 – moving carriages; 4 – carriage movement drive; 5 – crossoverpass

частиц ценных компонентов включает процессы выемки, транспортировки, грохочения, периодической гидродинамической и ультразвуковой дезинтеграции, классификации с разделением на фракции +0,5 мм и -0,5 мм. Фракция размером +0,5 мм проходит гравитационное предобогащение, перечистку на концентрационных столах или специальных обогатительных агрегатах с кавитационным инициированием, гравитационно-флотационную доводку, электромагнитную сепарацию с разделением на магнитную и немагнитную фракции, электросепарацию с выделением проводников и непроводников. Фракция -0,5 мм проходит обогащение в центробежных концентраторах, перечистку на концентрационных столах, электромагнитную сепарацию и металлургическую переработку (рис. 3, 4). Предлагаемая технологическая линия на схеме на рисунке 3 выделена справа, а исключаемая из производственного цикла линия изображена слева. Выемку глинистых золотосодержащих песков и их транспортировку на обогащение можно производить колесными скреперами, оборудованными интенсификатором загрузки в виде подгребающей стенки, перемещающейся внутри ковша [16]. Скреперы с традиционными интенсификаторами в виде скребковых и шнековых элеваторов на глинистых песках оказываются малоэффективными, поскольку на элеваторы происходит

интенсивное налипание глины. Применение на стадии периодической дезинтеграции модульного передвижного геотехнологического комплекса эстакадного типа [17] позволит осуществить эффективное разделение мелких и тонких частиц ценных компонентов, выделяя их из глинистой массы гидросмеси (рис. 4).

Комплекс снабжён жёстко закреплённой на опорах эстакадой 1 и модулем дезинтеграции с периодическим гидродинамическим воздействием. Гидродинамические дезинтеграторы 2 снабжены рыхлителями (рис. 4). Для решения проблемы эффективного разрушения высокоглинистых песков могут быть использованы системы на основе развития гидроакустических эффектов [18] или гидродинамических, например, таких как гидродинамические кавитаторы с низкой ёмкостью потребления энергии, разработанные в лаборатории разработки россыпных месторождений ИГД ДВО РАН [19] или системы с ультразвуковым излучением (рис. 5) [17]. Модуль дезинтеграции 1 снабжён модулем ультразвукового излучения 2 (рис. 5). Подвижная каретка 3 снабжена приводом 4 перемещения её вдоль поперечины эстакады 5 и приводом поворота модуля ультразвукового излучения 2 вокруг оси (рис. 5).

Модуль ультразвукового излучения снабжён приводами перемещения системы ультразвуковых излучателей в вертикальной

плоскости и двухсторонним приводом перемещения системы ультразвуковых излучателей в горизонтальной плоскости. Для определения параметров ультразвукового воздействия на гидросмесь, минеральная составляющая которой представляет собой исследованные пески, задаются двумя исходными минимальным и максимальным соотношениями масс минеральной составляющей и воды. Полученные расчётом интервалы интенсивности ультразвука для дезинтеграции твёрдой составляющей гидросмесей исследуемых песков находятся в пределах от 1,8 до 2,6 Вт/см² при содержании воды от 70 до 40%. При содержании воды от 30 до 25% интенсивность ультразвука должна составлять от не менее 5,0 Вт/см². Могут также применяться кавитационные реакторы [20].

Процесс глубокой дезинтеграции минеральной составляющей на первичной стадии переработки с исключением растворов реагентных добавок и полного поступления гидросмеси на последующие стадии переработки позволяет исключить потери ценных компонентов, снизить объёмы потребления воды и значительно сократить геохимические потоки рассеивания и последующие геохимические аномалии в водотоках. Расход оборотной и повторно используемой воды на 1 м³ добытых горных пород в предлагаемом варианте комбинированной кавитационно-гидродинамической дезинтеграции составит 14 м³, а при реагентном разупрочнении с обширным использованием выщелачивания составит в 2–3 раза больше. Таким образом, предлагаемая технология существенно снизит поступление техногенных потоков, проходящихся на 1 м³ добытых горных пород. Снижение токсичности выбросов позволит снизить уровень негативного воздействия на окружающую среду, исключить аномальные ситуации и благотворно скажется на здоровье населения, проживающего в районах, близких к участкам разработки полезных ископаемых.

Заключение

Для обеспечения экологической безопасности при переработке песков комплексного полиминерального месторождения Приморского края проанализированы результаты исследования микроэлементного, фазового и гранулометрического состава пород. Установлены преобладающие по массе элементы: фосфор, лантан, церий, неодим, барий, цирконий, хром, стронций, медь, цинк, рубидий и вольфрам, а также глинистые минералы,

затрудняющие процесс выделения ценных компонентов. Выявленная совокупность минеральных компонентов обладает высокой миграционной способностью и токсичностью. Для решения проблемы разработана технология, сокращающая операции выщелачивания и гидрометаллургической переработки. Разработанная технология включает новые установки, обеспечивающие разрушение глинистой составляющей посредством ультразвукового и кавитационного воздействия, гидроакустических эффектов или гидродинамических, например, с помощью таких установок, как гидродинамические кавитаторы с низкой ёмкостью потребления энергии, на минеральную составляющую гидросмеси с исключением реагентного разупрочнения.

За счёт применения новых подходов к процессу дезинтеграции высокоглинистых песков с использованием геотехнологического комплекса, сочетающего гидродинамическое и ультразвуковое воздействия, новая технология позволит снизить потери ценных компонентов, геохимические техногенные потоки и исключить аномальные ситуации. Значительно сократятся площади для складирования токсичных отходов и размещения отстойников, снизятся затраты на контроль остаточных концентраций сильных полиэлектролитов – кислот и систематическую токсикологическую оценку.

References

1. Aleksandrova T.N., Lipina L.N., Krupskaya L.T. Assessment of the impact of natural mining systems in mining environmental gold Wednesday // Gorny informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). 2010. No. 6. P. 286–292 (in Russian).
2. Mjazin V.P., Shesternev D.M., Shumilova L.V. Creating a new resource-saving technologies of gold extraction from hard and it is difficult to retrieve minerals man-made clay deposits // Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. Novosibirsk: Institut gornogo dela im. N.A. Chinakala SO RAN, 2018. V. 5. No. 2. P. 103–107 (in Russian).
3. Kostenko O.V., Popov M.A., Lutovac M. "Smart" state regulation in the field of environmental protection and natural resources management // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 116–121 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-116-121
4. Ryabova E.G. Contents of heavy metals in urban ponds // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 36–40. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-036-040
5. Laarmann D., Korjus H., Sims A., Kangur A., Kivistu A., Stanturf J.A. Evaluation of afforestation develop-

ment and natural colonization on a reclaimed mine site // *Restoration Ecology*. 2015. V. 23. No. 3. P. 301–309. doi: 10.1111/rec.12187

6. Ngugi M.R., Neldner V.J., Doley D., Kusy B., Moore D., Richter C. Soil moisture dynamics and restoration of self-sustaining native vegetation ecosystem on an open-cut coal mine // *Restoration Ecology*. 2015. V. 23. No. 5. P. 615–624. doi: 10.1111/rec.12221

7. Naeth M.A., Wilkinson S.R. Establishment of restoration trajectories for upland tundra communities on diamond mine wastes in the Canadian Arctic // *Restoration Ecology*. 2014. V. 22. No. 4. P. 534–543. doi: 10.1111/rec.12106

8. Sena K., Barton C., Hall S., Angel P., Agouridis C., Warner R. Influence of spoil type on afforestation success and natural vegetative recolonization on a surface coal mine in Appalachia United States // *Restoration Ecology*. 2015. V. 23. No. 2. P. 131–138. doi: 10.1111/rec.12164

9. Savchenko O.V. The influence of pollution of heavy metals on wednesday the health of preschool children // *Ekologiya cheloveka*. 2018. No. 3. P. 16–20 (in Russian).

10. Zemlyanova M.A., Tiunova A.I., Stepankov M.S., Ivanova A.S. The potential health risks of nano cobalt oxide // *Ekologiya cheloveka*. 2018. No. 1. P. 36–40 (in Russian).

11. Statistics on the State of and trends in health of Primorsky Krai [Internet resource] <https://www.primorsky.ru> (Accessed: 24.04.2019) (in Russian).

12. Elshin V.V., Melnyk S.A. Current state and prospects of development of technology of desorption of gold from the saturated activated carbons // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014. No. 9–10. P. 114–118.

13. Joe Z., Bruce J., Chris M. Establishing the process mineralogy of gold ores // *Technical Bulletin*. 2004. No. 14. P. 1–5.

14. Dai Z.-J., Kuang Z.-B., Zhao S.-X. Reflection and transmission of elastic waves from the interface of a fluid-saturated porous solid and a double porosity solid // *Transport in Porous Media*. 2006. V. 65. P. 237–264. doi: 10.1007/s11242-005-6084-5

15. Myazin V.P. Improving the efficiency of processing clay gold-bearing sands. Ch. 2. Chita: ChitGTU, 1996. 119 p. (in Russian).

16. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass // *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. V. 38. P. 100–114. doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.38.100

17. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Litvincev V.S., Sekisov G.V. Geotechnological complex for the development of gold placers // Patent RU 2325533 C1. Application: 2006146393/03, 25.12.2006. Date of publication: 27.05.2008. Bull. No. 15 (in Russian).

18. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Improving micro-disintegration processes of sands of an integrated deposit of precious metals with high strength characteristics // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017. V. 58. No. 4. P. 330–334.

19. Khrunina N.P., Prohorov K.V. Process improvement of processing ores zoloto silver integrated deposits of precious metals // *Izvestiya Vuzov. Non-ferrous metallurgy*. 2019. No. 2. P. 4–12 (in Russian).

20. Khrunina N.P. Way to the disintegration of the mineral components of hydraulic fluid in terms of resonance acoustic phenomena in gidro-thread and geotechnologically complex for its implementation // Patent RU 2506128C1. Application: 2012140887/03, 24.09.2012. Date of publication: 10.02.2014. Bull. No. 4 (in Russian).

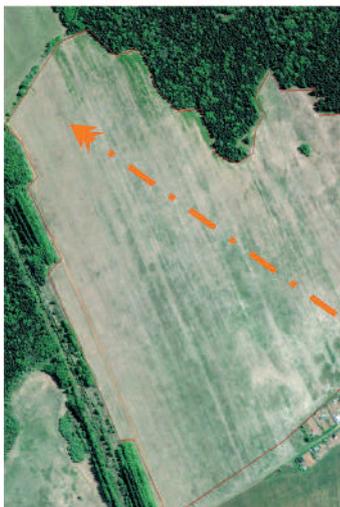
Е. А. Домнина, Т. А. Адамович, А. С. Тимонов, Т. Я. Ашихмина
«Мониторинг зарастания заброшенных земель
сельскохозяйственного назначения
по спутниковым снимкам высокого разрешения». С. 82.



3. (14.08.2017)



2. (30.05.2015)



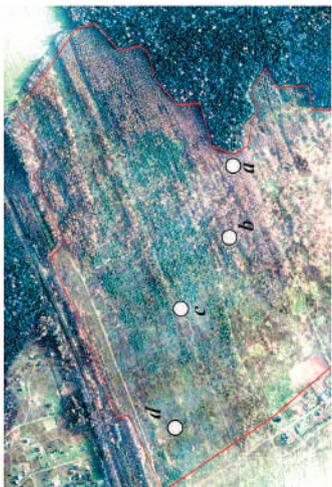
1. (13.05.2010)*



4a



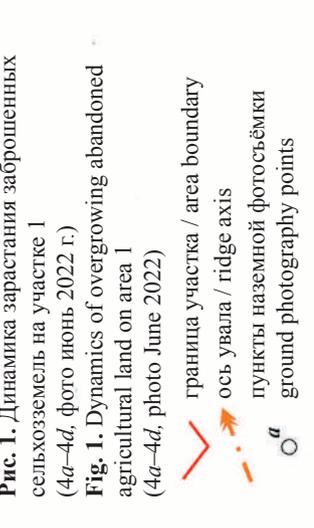
5. (05.07.2021)



4. (12.10.2020)



4b



4c



4d

Рис. 1. Динамика зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель на участке 1 (4a–4d, фото июнь 2022 г.)

Fig. 1. Dynamics of overgrowing abandoned agricultural land on area 1 (4a–4d, photo June 2022)

 граница участка / area boundary
 ось увала / ridge axis
 пункты наземной фотосъёмки
 ground photography points

* здесь и далее в скобках приведена дата спутникового снимка here and below in parentheses is the date of the satellite image

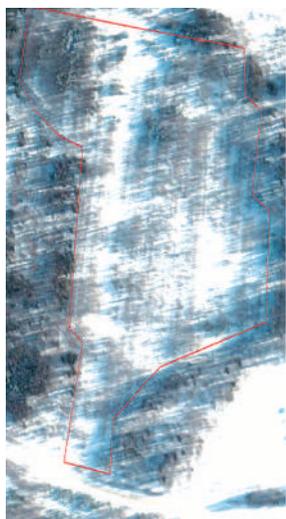
Е. А. Домнина, Т. А. Адамович, А. С. Тимонов, Т. Я. Ашихмина
 «Мониторинг зарастания заброшенных земель
 сельскохозяйственного назначения
 по спутниковым снимкам высокого разрешения». С. 82.



Рис. 2. Динамика зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель на участке 2 (6а – 6с, фото июнь 2022 г.)
Fig. 2. Dynamics of overgrowing abandoned agricultural land on area 2 (6a – 6c, photo June 2022)

Условные обозначения смотри на рисунке 1.
 Symbols see Figure 1.

Е. А. Домнина, Т. А. Адамович, А. С. Тимонов, Т. Я. Ашихмина
«Мониторинг зарастания заброшенных земель
сельскохозяйственного назначения
по спутниковым снимкам высокого разрешения». С. 82.



3. (09.03.2010)



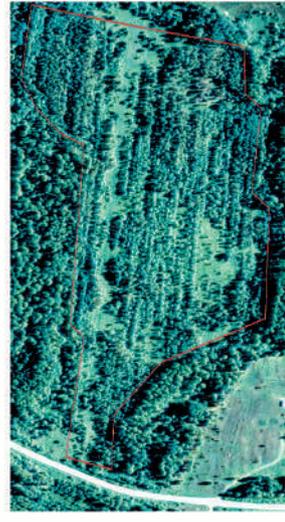
2. (13.10.2005)



1. (06.05.2004)



6. (06.10.2021)



5. (10.09.2018)



4. (06.05.2016)



6c



6b



6a

Рис. 3. Динамика зарастания заброшенных сельскохозяйственных земель на участке 3 (6a–6c, фото июнь 2022 г.)
Fig. 3. Dynamics of overgrowing abandoned agricultural land on area 3 (6a–6c, photo June 2022)

Условные обозначения смотри на рисунке 1.
 Symbols see Figure 1.

S. Llerena, G. Toasa, A. I. Kurbatova
 "NDVI – alpha diversity relationship
 in tropical montane cloud forest of Ecuador". P. 58.

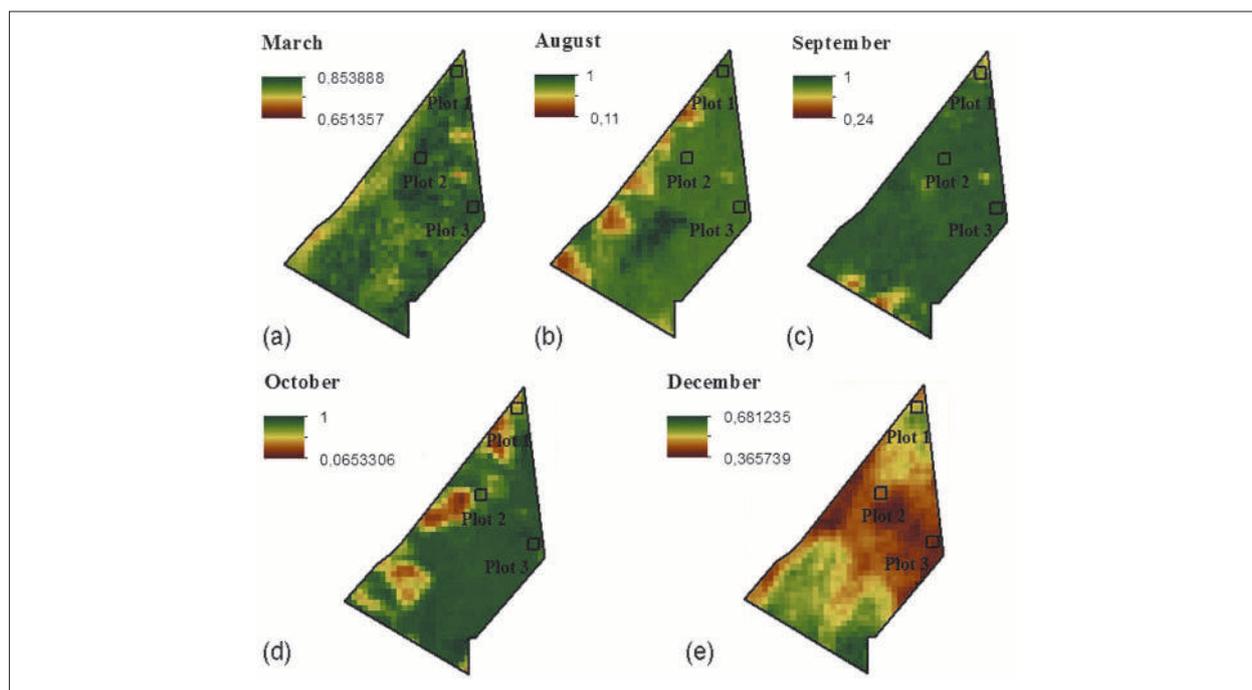


Fig. 3. "El Cedral" Normalized Differential Vegetation Index map for: (a) March 2019, (b) August 2019, (c) September 2019, (d) October 2019, (e) December 2019

Е. В. Федосеева, А. П. Кирюшина, Д. И. Стом, В. А. Терехова
 «Устойчивость почвенных микромицетов *Trichoderma viride*
 и *Alternaria alternata* к тяжёлым металлам Cu и Pb». С. 118.

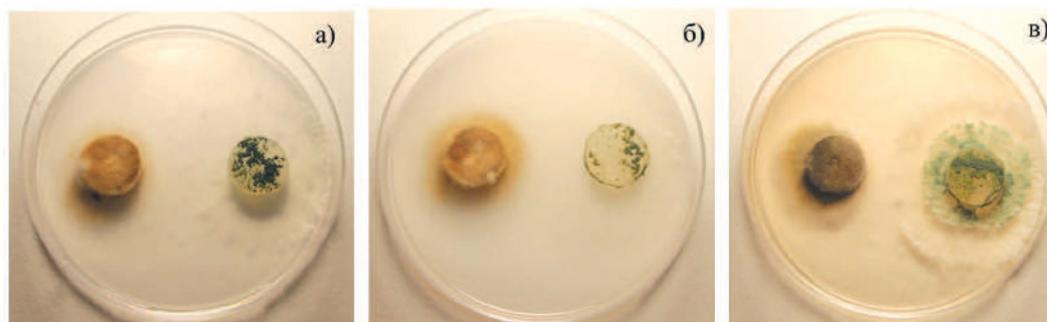


Рис. 3. Фиксация антагонистических свойств методом встречных культур *A. alternata* и *T. viride*: а) на среде Чапека (контроль); б) с Pb; в) с лигногуматом
 Fig. 3. Fixation of antagonistic properties by the competition method of *A. alternata* and *T. viride*: a) on Czapek medium (control); b) with Pb; c) with lignohumate

R. Berdja, L. Lamari, N. Bouras, M. D. Holtz
 "Host by strain association study of rhizospheric actinobacteria
 on two Algerian date palm cultivars". P. 135.

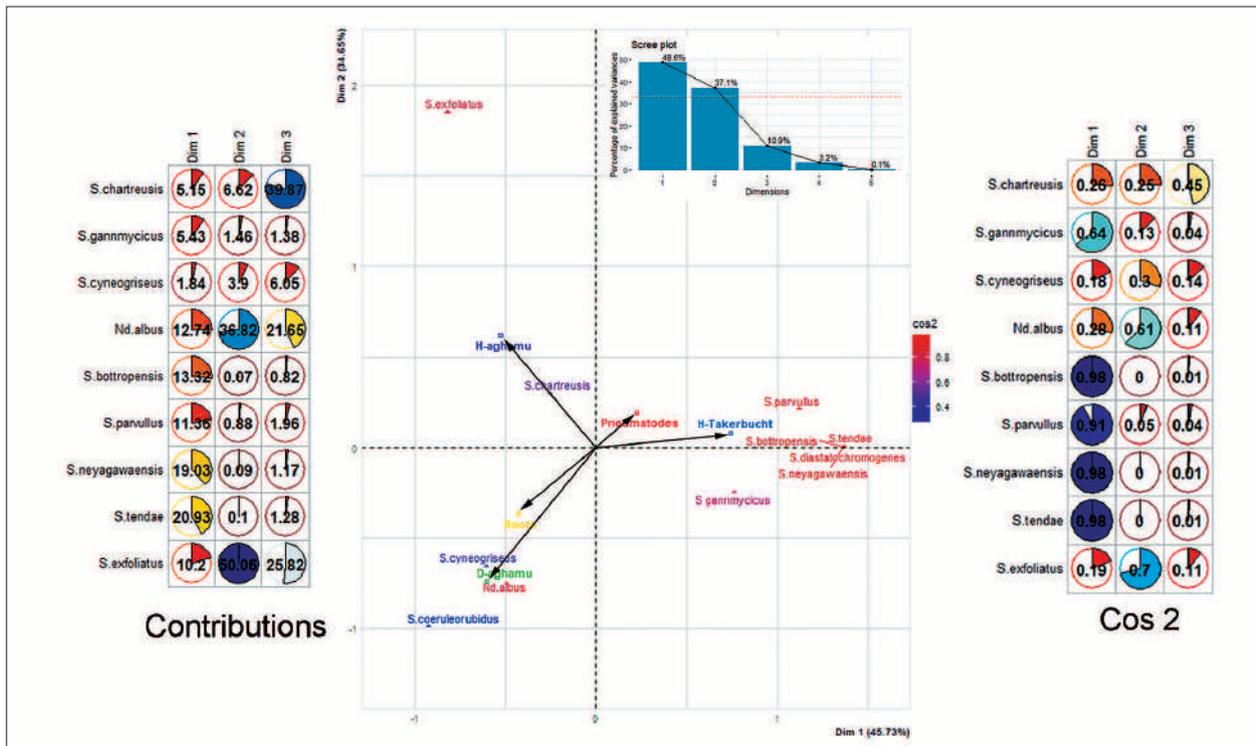


Fig. 3. Correspondence analysis biplot of species score and Cultivar's health state/penetration point. Cultivar groups: Dim 1 [healthy Takerbucht], Dim 2 [healthy Aghamu], Dim 3 [diseased Aghamu] and penetration point groups: 1 [endorhizosphere], 2 [pneumatodes]

И. В. Новаковская, Е. Н. Патова, Е. Г. Макеева
 «Снежные водоросли и цианобактерии
 ряда районов Урала и Западного Саяна». С. 149.

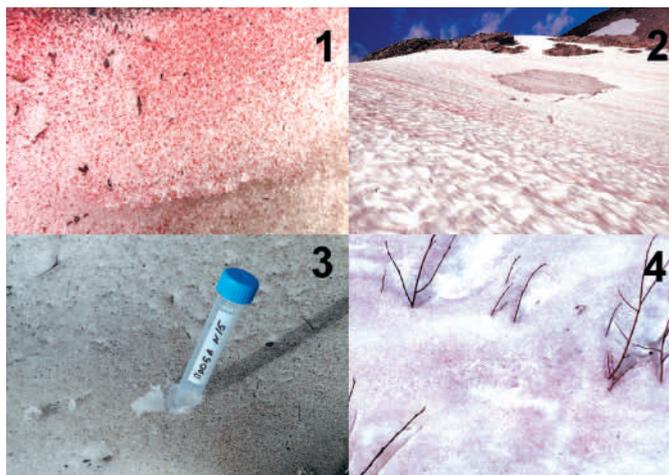
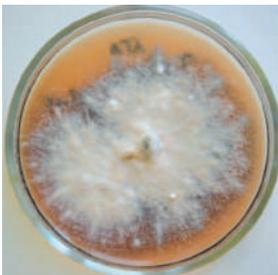
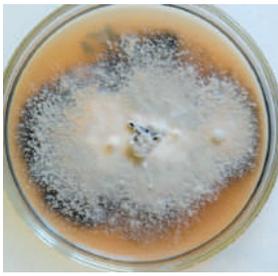


Рис. 1. Места отбора альгологических проб: 1 – Полярный (красное «цветение» снега); 2 – Приполярный (красное «цветение» снега); 3 – Северный Урал (коричневое «цветение» снега); 4 – Западный Саян (красное «цветение» снега)
 Fig. 1. Algological sampling sites: 1 – Polar (red “bloom” of snow); 2 – Subpolar (red “bloom” of snow); 3 – Northern Urals (brown “bloom” of snow); 4 – Western Sayan (A – red “bloom” of snow)

А. В. Бакулина, Д. В. Попыванов, А. В. Харина
«Изучение свойств местных изолятов фитопатогенного гриба
***Parastagonospora nodorum*». С. 213.**

Таблица 1 / Table 1

Культурально-морфологические признаки местных изолятов *P. nodorum* на КГА
 Cultural and morphological characteristics of local *P. nodorum* isolates on the PGA

Изолят (сорт пшеницы), тип колонии Isolate (wheat cultivar), colony type	Изолят (сорт пшеницы), тип колонии Isolate (wheat cultivar), colony type
TR1 (Терция)	TR2 (Терция)
 <p>мицелиальные, серо-розовые, гранулированные, с выраженным светлым растущим краем $d^* = 44,5$</p>	 <p>мицелиальные, серые, отсутствие чётко выраженной краевой зоны, воздушный мицелий $d = 81,3$</p>
P12 (Росинка)	H7 (Нива 2)
 <p>мицелиальные, серые, гранулированные, край более тёмного цвета, воздушный мицелий $d = 71,8$</p>	 <p>мицелиальные, серые, мицелий в центре более плотный, выпячивающийся над субстратом, редкий по краям $d = 67,0$</p>
H9 (Нива 2)	KR (Красноярская)
 <p>мицелиальные, серые, гранулированные со светлыми вкраплениями, краевая зона не чёткая $d = 83,0$</p>	 <p>мицелиальные, белые, мицелий в центре более плотный, выпячивающийся над субстратом, редкий по краям $d = 80,7$</p>
SB (Sibia)	TC (Torridon)
 <p>мицелиальные, плотные, центр колонии светло-серый, средний слой светло-коричневый, край тёмно-оливковый, радиально расходящаяся складчатость $d = 69,2$</p>	 <p>мицелиальные, в окраске 2–3 цвета, преобладает оливковый, отмечаются концентрически расходящиеся круги (разного оттенка), чётко выраженная краевая зона $d = 80,3$</p>

* Средний диаметр 3 колоний (мм) / The average diameter of the 3 colonies (mm)

А. В. Минкина, С. А. Двинских, Т. В. Зуева
«Подход к разработке интегрального индекса
экологического благополучия территории». С. 236.

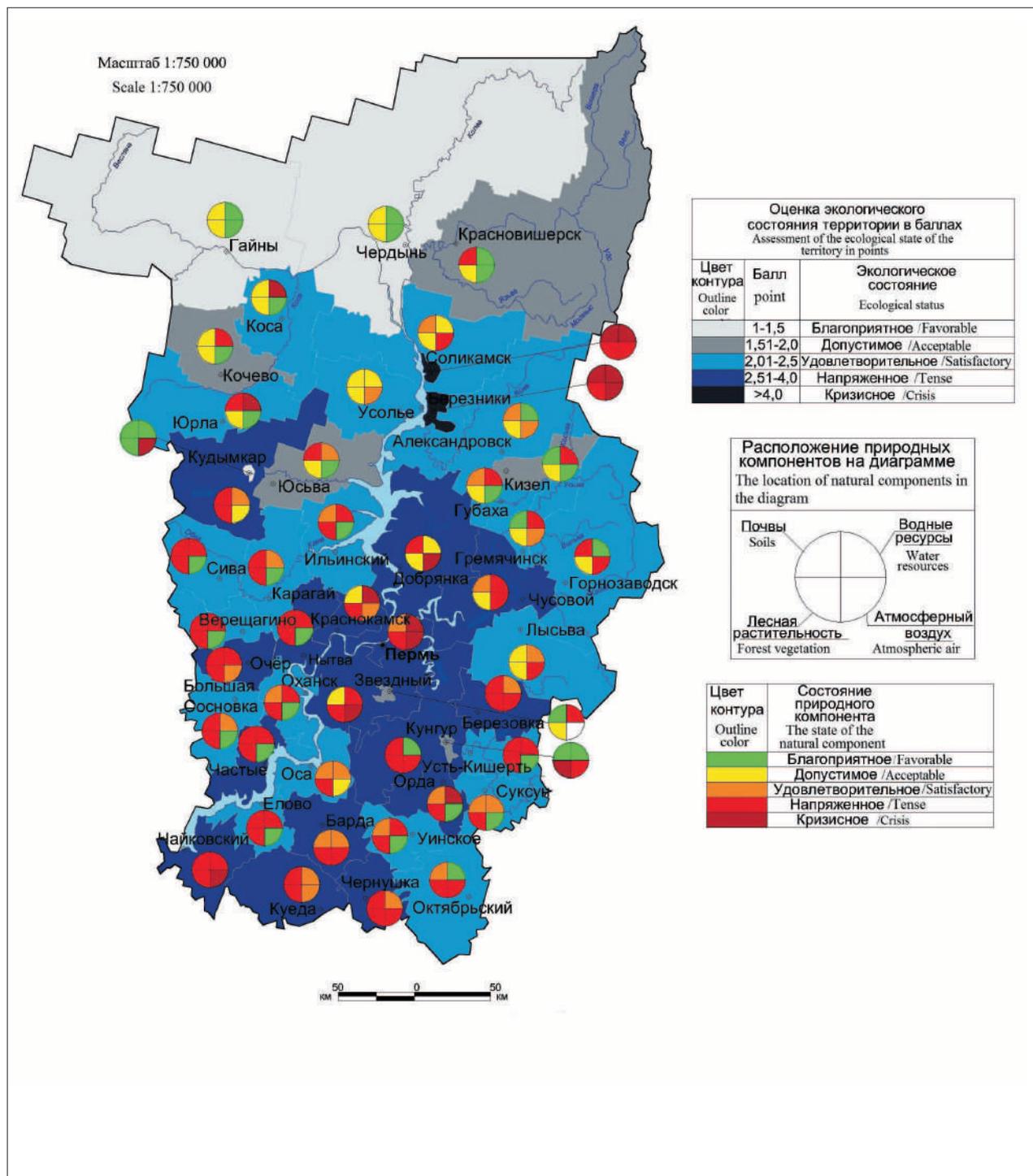


Рис. 1. Оценка экологического состояния Пермского края [15]
Fig. 1. Assessment of the ecological state of the subjects of the Perm Krai [15]

А. В. Минкина, С. А. Двинских, Т. В. Зуева
«Подход к разработке интегрального индекса
экологического благополучия территории». С. 236.

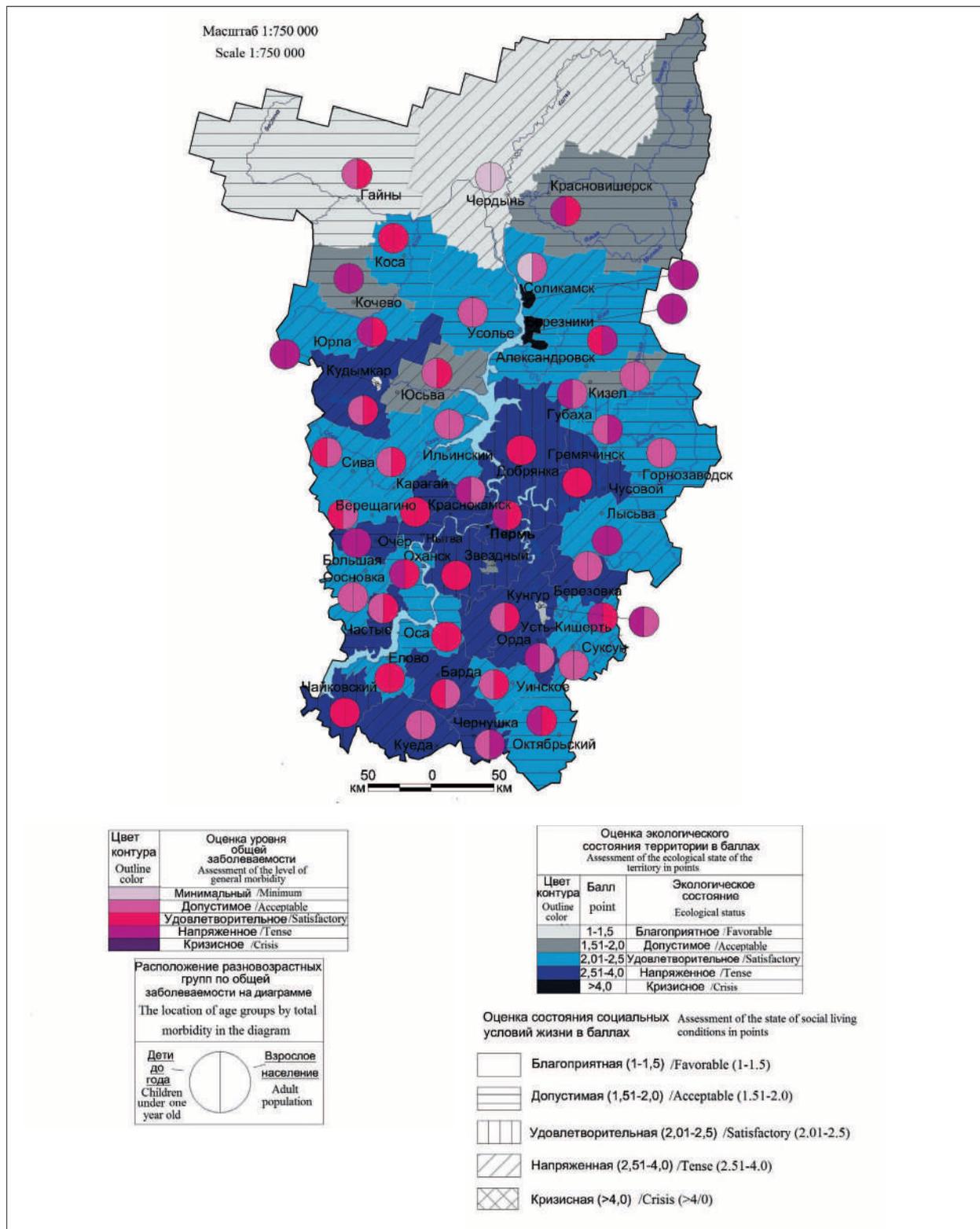


Рис. 3. Распределение уровня общей заболеваемости в Пермском крае
Fig. 3. Distribution of the level of general morbidity in the Perm Krai

Host by strain association study of rhizospheric actinobacteria on two Algerian date palm cultivars

© 2022. R. Berdja¹ ORCID: 0000-0001-8391-2379, L. Lamari² ORCID: 0000-0003-1378-4847

N. Bouras^{2,3} ORCID: 0000-0003-2714-5026, M. D. Holtz⁴ ORCID: 0000-0002-1739-7871

¹Laboratoire d'Amélioration des Techniques de Protection Phytosanitaire en Agro-systèmes Montagneux: cas des Aurès (LATPPAM), Université de Batna 1,

Allée 19 May, Route de Biskra, Batna, Algeria, 05000,

²Laboratoire de Biologie des Systèmes Microbiens (LBSM), École Normale Supérieure de Kouba, Avenue des frères Abdeslami, Vieux-Kouba, Alger, Algeria, 16308,

³Université de Ghardaia,

Zone scientifique, Bounoura, Ghardaïa, Algeria, 47000,

⁴Field Crop Development Centre, Alberta Agriculture and Forestry, 5030-50 St., Lacombe AB, Alberta, Canada, T4L1W8,

e-mail: brafik12@hotmail.fr

Extreme ecosystems such as the Algerian Sahara can be a source of untapped microorganisms that produce novel bioactive compounds against fusarium wilt disease. Effective control of fusarium wilt agent *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* relies on a thorough understanding of host-by-strain relations. Achieving this understanding can be highly beneficial, particularly for extensive multidimensional experiments. This paper investigates the qualitative and quantitative distribution of the actinobacteria in the rhizosphere (endorhizosphere and pneumatodes) of two date palm cultivars, one resistant (Takerbucht) and one susceptible to fusariosis (Aghamu). Consequently, 199 actinobacterial isolates were recorded; 13 species were identified, 6 were identified in root tips, and 10 in pneumatodes. The highest actinobacterial densities were recorded in the rhizospheric soils of the susceptible cultivar. However, the dominant species are present in the roots of the resistant ones. Differences in the composition of genera and species were found between cultivars. Actinobacteria are mainly represented by the genera *Streptomyces* and *Nocardioides*, which are respectively related to healthy and diseased date palm cultivars. Numerically, the most important species are related to *S. chartreusis*, *Nocardioides albus* and *S. gannmycicus*. Consequently, correspondence analysis facilitated the visual representation (associations patterns) of host-by-strain data and confirmed the aforementioned findings.

Keywords: Actinobacteria, saharan oases, date-palm, endorhizosphere, Pneumatodes, host by strain association.

УДК 579.64

Исследование ассоциации хозяев по штаммам ризосферных актинобактерий на двух алжирских сортах финиковой пальмы

© 2022. Р. Берджа¹, д. с.-х. н., преподаватель-исследователь фитопатологии, Л. Ламари², профессор биологии, преподаватель-исследователь микробиологии,

Н. Бурас^{2,3}, профессор биологии, преподаватель-исследователь кафедры микробиологии, доктор медицины,

М. Д. Хольц⁴, профессор биологии, преподаватель-исследователь кафедры фитопатологии,

¹Лаборатория мелиорации и методов фитосанитарной защиты агросистем Монтанью: кас де Аурес, Университет Батна 1,

Аллея 19 Мая, Дорога на Бискру, Батна, Алжир, 05000,

²Лаборатория биологии микробных систем, Высшая нормальная школа Кубы, Аллея братьев Абдеслами, Вьё Куба, Алжир, Алжир, 16308,

³Университет Гардая,

Научная зона, Бунура, Алжир, 47000,

⁴Центр развития полевых культур сельского и лесного хозяйства провинции Альберта, 5030, 50-я ул., г. Лакомб, Альберта, Канада, T4L1W8,

e-mail: brafik12@hotmail.fr

Экстремальные экосистемы, такие как Алжирская Сахара, могут быть источником неиспользованных микроорганизмов, которые производят новые биоактивные соединения против фузариозного увядания. Эффективная борьба с возбудителем фузариозного увядания *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* основана на исследовании отношений между хозяином и патогеном. В данной статье исследуется качественное и количественное распределение актинобактерий в ризосфере (эндоризосфера и пневматоде) двух сортов финиковой пальмы, устойчивого (Takerbucht) и восприимчивого к фузариозу (Aghamu). Было зарегистрировано 199 изолятов актинобактерий. Выявлено 13 видов, 6 в кончиках корней и 10 – в пневматодах (листьях). Наибольшая плотность актинобактерий отмечена в ризосферных почвах восприимчивого сорта. Однако доминирующие виды присутствуют в корнях устойчивых. Между сортами обнаружены различия в составе родов и видов. Актинобактерии в основном представлены родами *Streptomyces* и *Nocardioideis*, которые относятся соответственно к здоровым и больным сортам финиковой пальмы. Численно наиболее важные виды родственны *S. chartreusis*, *Nocardioideis albus* и *S. gannmycicus*. Таким образом, анализ соответствий облегчил визуальное представление (паттерны ассоциаций) данных по штамму хозяина и подтвердил вышеупомянутые выводы.

Ключевые слова: актинобактерии, сахарские оазисы, финиковая пальма, эндоризосфера, пневматоде, ассоциация хозяев за штаммами.

Actinobacteria, formerly known as actinomycetes, are a group of microorganisms commonly found even in the soils of extreme ecosystems, such as the Saharan soils of Algeria that are permanently exposed to challenging climatic conditions. These soils are ecosystems worth of being explored because of their significant biodiversity [1, 2].

Actinobacteria are embroiled in the ecology of these extreme habitats, as they are involved in several transformation processes of complex biopolymers (lignocellulose, hemicellulose, pectin, keratin, chitin) as well as being recommended as potential biocontrol agents, such as certain species of *Streptomyces*, which can produce effective antibiotics against phytopathogenic fungi such as *Fusarium oxysporum*, *Pyrenochaeta lycopersici*, *Sclerotium rolfsii*, *Sclerotinia sclerotiorum* and *Botrytis cinerea* [3–6].

In-plant pathology, host-by-pathogen or genotype-by-strain association are particular cases of genotype-by-environment interactions studies. This is especially true for host-by-strain interactions/associations in which there are clear race differentiations such that a host genotype can be described as resistant or susceptible according to a specific/unique interaction pattern. These patterns of associations are generally challenging to characterize because of the complexity of generated data that frequently span on multiple dimensions [7].

A genotype-by-strain association study on actinobacterial species distribution was conducted to characterize species associated with healthy and diseased date palm cultivars. The association pattern was assessed on healthy/resistant and diseased/susceptible cultivars affected by *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* (Killian et Maire) [8], which is a significant threat to date-palm oases located in southwestern Algeria and the M'zab region [9–12].

Actinobacterial species distribution was assessed at two different potential penetration points of *F. oxysporum* f. sp. *albedinis*, namely on young root tips (endorhizosphere) and pneumatodes, which are complex respiratory structures that form on older roots.

Materials and methods

Study site. The study site is an oasis with a typical Saharan climate located in southwest Algeria (28°00'N, 0°30'W) in the territorial division of Adrar (south-western Algeria). The experiment was carried out on a 160 × 20 m plot composed of 133 date palms belonging to the cultivars Takerbucht (resistant) and Aghamu (susceptible) to fusarium wilt (Bayoud disease) caused by *F. oxysporum* f. sp. *albedinis*. Thirty percent of the susceptible date palms were affected by this disease in study area.

Rhizosphere sampling. Five plots, separated from each other by approximately 25 m were delimited. Each plot consisted of three date-palm trees arranged in a triangle. These consisted of one resistant Takerbucht palm tree and two susceptible Aghamu trees where one was healthy (no symptoms) and the second showed typical symptoms of fusarium wilt. For the latter, the disease was confirmed after isolation of *F. oxysporum* f. sp. *albedinis* from the rachis.

Isolation and enumeration of actinobacteria from the endorhizosphere and pneumatodes. Roots were collected at 25–40 cm depth from all around the date-palm trees. Two types of structures are considered: (i) young roots with exuding root tips and (ii) old roots with whitish sleeves at the base of their branches (pneumatodes).

Young roots tips and aged roots carrying pneumatodes were washed and disinfected with sterile distilled water and 3.5% aqueous calcium

hypochlorite solution. Both were cut (2 cm long), ground separately, filtered; and from the resulting suspension, decimal dilutions were made.

The enumeration in colony forming units (CFU) per gram of dry roots was carried out after 7–15 days of incubation. The actinobacteria were isolated on Petri dishes by the mean of suspension-dilution method [13] and spread on the “chitin-agar” medium of Lingappa and Lockwood [14].

Identification of actinobacteria. Actinobacterial species and genera identification was based on macromorphological cultural characteristics (colour of aerial and/or substrate mycelium and diffusible pigments), micromorphological structures (spore production, number of spores and arrangement, straight to flexuous, hooked, looped or spiral spore chains disposition) as stated in the Bergey’s manuals [15].

We determined the configuration of the isomer (LL or DL) of diaminopimelic acid, as well as the presence of glycine [16], characteristic sugars [17] and the presence of parietal mycolic acids on cell walls [18]. In addition, several determination keys were checked out [8, 15, 19–21].

Twenty-three (23) biochemical tests (carbohydrate assimilation as sole carbon source) were determined as described by [22].

Statistical analysis. All data were analyzed in R for Windows v4.1.0 [23] using the R-Studio GUI v1.4.1717. Multivariate genotype-by-strain data were analyzed using correspondence analysis using abstract and product terms using FactoMineR, Factoextra and Corrplot [24–26].

Results and discussion

Quantitative distribution of actinobacteria.

Enumeration results in Figure 1 showed a large variability in bacterial density between the five lots, ranging from 0.1 to $62 \cdot 10^4$ CFU/g root and 1.5 to $83.3 \cdot 10^4$ CFU/g in pneumatodes. This variability is even observed within the same cultivar, whether healthy or diseased (i. e., diseased Aghamu: 0.33 to $62 \cdot 10^4$ CFU/g root and 4.17 to $83.3 \cdot 10^4$ CFU/g in pneumatodes). This heterogeneity can be related to the uneven distribution of the organic matter (1.1, 2.1, 3.2, 4.3 and 6.3% respectively in lot D, E, A, C and B). Thus, the relatively small quantity and nature of the organic matter, along with a heterogeneous amendment with N-P-K fertilizers typically combined with organic fertilizers, results in a quantitative variability between the investigated

plots and the proliferation of non-yeast-like bacteria at the expense of actinobacteria.

The comparison of the distribution of actinobacteria regarding penetration points areas indicates that their density is much higher in the pneumatodes than in the endorhizosphere, whether in diseased Aghamu, healthy Aghamu or Takerbucht. This can be explained by the loose anatomical structure of the pneumatodes compared to young roots [27, 28]. This flexible structure allows easy entry and adhesion of rhizospheric microflora and pathogens such as *F. oxysporum* f. sp. *albedinis*.

Overall, few actinobacterial species were able to colonize the interior of the roots in the five lots. Nevertheless, an exception can be seen in root tips of healthy and diseased Aghamu (lots A and B), which hosted more actinobacteria than the pneumatodes did. This exception is due to the exudation process, as it was found that susceptible cultivars exudate a large amount of easily assimilable carbohydrates, proteins, lipids and mineral salts. Whereas resistant cultivars secrete complex substances such as organic acids and phenolic compounds, which inhibit phytopathogenic soil microorganisms. This process induces an adaptation of the local microflora that becomes typically associated with specific parts of the rhizosphere (Fig. 2 and 3). The same observation has been also reported by many authors [29, 30].

Qualitative distribution of actinobacteria.

This distribution is based on macromorphological, micromorphological and physiological criteria. A total of 199 actinobacterial isolates belonging to 13 species were identified. Six species were identified in root tips, and 10 in pneumatodes. Two species (*S. narensis* and *S. coeruleor*) are not represented in figure 2, and were excluded from subsequent analyses due to their rarity (1 occurrence/5 lots). All the recorded species belong to the genus *Streptomyces* (> 75%) or *Nocardioideis* (about 25%). The latter is less frequently isolated than *Streptomyces*, which are among the most widespread telluric genera worldwide (Fig. 2). This dictum has been noticed by other authors [31]. Indeed, in culture media, *Streptomyces* and *Nocardioideis* grow much faster than other actinobacteria, suggesting a higher competitive ability.

Isolated *Streptomyces* are characterized by the presence of an aerial mycelium that produces long chains of non-mobile spores (straight to flexuous, hooked, looped or spiralled) carried by sporophores and a non-fragmented substrate mycelium. Their cells contain the LL isomer of diaminopimelic acid (DAP), glycine and sugars

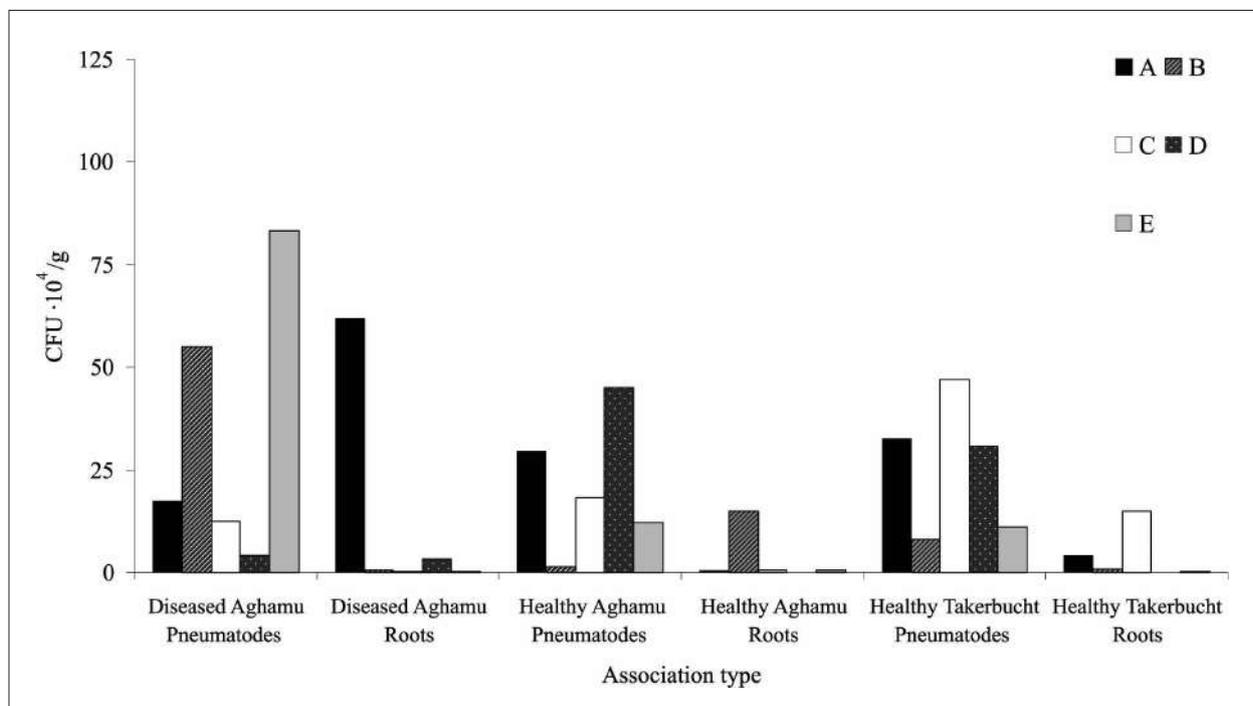


Fig. 1. Actinobacterial density (10⁴ CFU per gram of dry root) at the endorhizosphere and pneumatode of the cultivars Aghamu and Takerbucht

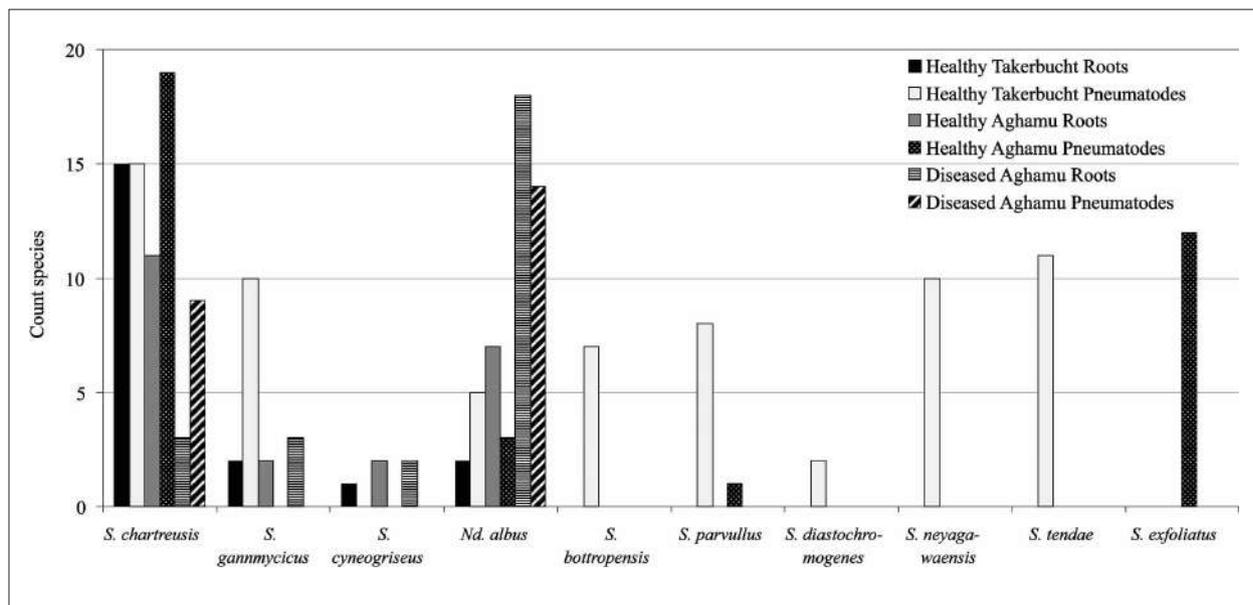


Fig. 2. Species distribution of the 197 isolates identified on pneumatodes and endorhizosphere in healthy and diseased cultivars

such as ribose, glucose and galactose; mycolic acids are absent. The isolates of *Nocardioidea* are characterized by an aerial mycelium and a substrate mycelium with short filaments that fragment into non-mobile elements. Their cells contain the LL-isomer of DAP, glycine, ribose, glucose and galactose; mycolic acids are also absent.

The dominant species are *S. chartreusis* (36.54%) and *N. albus* (24.87%). In the present study, *S. chartreusis* is equally distributed between healthy cultivars (83.32%). This percentage decreases sharply in the susceptible cultivar Aghamu when diseased (16.66%). For *N. albus*, the results are inverted. This species is present at 14.28% in the resistant cultivar Takerbucht,

20.4% in healthy Aghamu and 65.3% in diseased Aghamu; this species is ubiquitous and is present in all sampled lots.

The species *S. gannmycicus*, primarily associated with pneumatodes of the resistant cultivar Takerbucht, constitutes 8.62% of the total isolates. The rest of the species: *S. parvulus*, *S. bottropensis*, *S. tendae*, *S. diastatochromogenes*, *S. eyagawaensis*, *S. cyneogriseus*, *S. coeruleorubidus* and *S. exfoliatus* share the fourth rank of the most dominant species and may be specific to one or other part of the rhizosphere or be even quite rare (i. e. *S. narensis* and *S. coeruleor*).

The species *S. chartreusis* and *S. gannmicicus* are two species associated with the healthy state of both cultivars. Indeed, *S. chartreusis* is a non-specific (ubiquitous) species present on all sampled lots and *S. gannmicicus* is a species predominantly found on pneumatodes. *In vitro* confrontation tests, highlighted the antagonistic activity of several isolates against *F. oxysporum* f. sp. *albedinis* (data not shown). These findings, may explain the infield direct (antibiosis) and indirect (attachment/penetration site/point occupancy) biocontrol of fusarium wilt populations [32].

Correspondence analysis results. Applying correspondence analysis “CA” on the data in figure 1 (6 rows and 11 columns, with 2 explanatory variables “cultivar’s health state and penetration points) results in figure’s 3 contributions and representation quality given by the Cos 2 colour scale. Each actinobacterial strain (active variable) cultivar’s health state and penetration points (supplementary variables) is represented by two scores for Dim 1 and Dim 2, respectively. When the scores of Dim 1 and Dim 2 are projected on the plane, each active and supplementary variable is displayed as a point on the biplot (Fig. 3, see color insert V).

The inertia of the first dimensions shows if there are strong relationships between variables and suggests the number of dimensions that should be studied. The first two dimensions of analysis express “80.37%” of the total dataset inertia; that means that the plane explains 80.37% of the rows (or columns) cloud total variability. This percentage is high, and thus the first plane represents an essential part of the data variability; From these observations, it is probably not helpful to interpret the 3rd dimensions (Fig. 3; Scree plot). Correspondence analysis results demonstrate an association between cultivar’s health state and penetration point area variables with a raw score per order ($\text{Chisq} = 227.33$, $p\text{-value} = 0.001$) [25]. However, no explicit pen-

etration point-related pattern is present (Wilk’s $\lambda = 0.69$). Instead, distances between individuals on the plane seems to be best separated by the cultivar’s health state variable (Wilk’s $\lambda = 0.35$; Fig. 3). At this stage, results suggest that subsequent analysis should consider cultivar’s health state as a factor but not penetration point structure. These findings should be taken with precaution as more evidence must be brought by analogues confirmatory studies [33].

Row and columns score contributions (Fig. 3) indicate that the first dimension represents the latent variable cultivar's phytosanitary health state which can either be healthy (Upside) or diseased date-palm (Downside). The second dimension represents the penetration point structure where associated species can be either linked to roots (left side) or pneumatodes (Rightside); the two latter are set in opposition on the biplot (Fig. 3).

Overall, three distinct clusters of isolate groups are present: cluster 1 consists of *S. parvulus*, *S. bottropensis*, *S. tendae*, *S. diastatochromogenes*, *S. neyagawaensis* and *S. gannmycicus*; cluster 2 consists of the isolate *N. albus*, *S. cyneogriseus*, *S. coeruleorubidus* and cluster 3 consists of two isolated groups, which are *S. exfoliatus* and *S. chartreusis* (Fig. 3). Among all actinobacteria, red or nearly red represented species are well projected on their respective dimension ($\cos^2 > 0.7$) (Fig. 3). Thus, all members of cluster 1 are well projected on Dim 1 and are all equally associated (species clustering together; no long vector) with the pneumatodes of healthy Takerbucht.

The unique *Nocardioides* isolated group is the only well-projected species among cluster 2 on Dim 2 and is associated with diseased Aghamu roots rather than pneumatodes. For cluster 3, *S. exfoliatus* is best projected on Dim 2, where it is strongly related to pneumatodes of healthy Aghamu even if it is plotted farthest. Finally, although *S. chartreusis* is a frequently encountered species (isolated from 4 among 5 lots), this species group is associated unambiguously with pneumatodes of healthy date-palm cultivars.

Conclusion

In the present host-by-strain association study, information on actinobacterial genera and species distribution in date palm rhizosphere are highlighted. Indeed, correspondence analysis allowed us to gain more insight through dimensionality reduction and graphical representation

of various isolate group association patterns on date-palm cultivars and their endorhizosphere and pneumatodes. Overall, differences were observed between cultivars resistant and susceptible cultivars (healthy or diseased), particularly in the distribution of some dominant actinobacterial species in the endorhizosphere. Globally, a negative relationship is observed between the two dominant genera (*Streptomyces* and *Nocardioideis*), as we have noticed an apparent decrease in the percentage of *Streptomyces* from Takerbucht to healthy then diseased Aghamu, in favour of the *Nocardioideis* genus, which is present at an exceptionally high percentage in diseased Aghamu. The rate of *Streptomyces* also decreases significantly in diseased Aghamu pneumatodes (compared to healthy Aghamu and Takerbucht). These findings are confirmed by the correspondence analysis biplot, where specific association patterns are emphasized. Further investigations should focus on the role and mechanisms of action of dominant rhizosphere species against the fusarium wilt pathogen *F. oxysporum* f. sp. *albedinis*, by considering their antagonistic capability (molecular characterization of secondary metabolites such as antibiotics and antifungals) for an integrated pest management strategy to limit Bayoud disease progression in Saharan oases.

This work is dedicated to the memory of the deceased Nasserline Sabaou and Ahmed Moustiri, who were among the pioneers and influential researchers who studied the microflora of Algerian Sahara oases. These two exceptional people of great kindness and dedication contributed to the training of many professionals and enlightened the path of the following generations of researchers, may they rest in peace.

References

1. Perry J.J., Staley J.T., Lory S. Microbiologie. Zanichelli, 2004. 592 p.
2. Sabaou N., Boudjella H., Bennadji A., Mostefaoui A., Zitouni A., Lamari L., Bennadji H., Lefèbre G., Germain P. Les sols des oasis du Sahara algérien, source d'actinomycètes, rares producteurs d'antibiotiques // Science et changements planétaires/Sécheresse. 1998. V. 9. No. 2. P. 147–153 (in French).
3. El-Shanshoury A.E.-R.R., El-Sououd S.M.A., Awadalla O.A., El-Bandy N.B. Effects of *Streptomyces corchorusii*, *Streptomyces mutabilis*, pendimethalin, and metribuzin on the control of bacterial and Fusarium wilt of tomato // Canadian Journal of Botany. 1996. V. 74. No. 7. P. 1016–1022. doi: 10.1139/b96-126

4. Errakhi R., Bouteau F., Lebrihi A., Barakate M. Evidences of biological control capacities of *Streptomyces* spp. against *Sclerotium rolfsii* responsible for damping-off disease in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2007. V. 23. No. 11. P. 1503–1509. doi: 10.1007/s11274-007-9394-7
5. Minuto A., Spadaro D., Garibaldi A., Gullino M.L. Control of soilborne pathogens of tomato using a commercial formulation of *Streptomyces griseoviridis* and solarization // Crop Protection. 2006. V. 25. No. 5. P. 468–475. doi: 10.1016/j.cropro.2005.08.001
6. Saravanamuthu R. Industrial exploitation of microorganisms / Eds. D.K. Maheshwari, R.C. Dubey, R. Saravanamuthu. New Delhi: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2010. 448 p.
7. Yan W., Falk D.E. Biplot analysis of host-by-pathogen data // Plant Disease. 2002. V. 86. No. 12. P. 1396–1401. doi: 10.1094/PDIS.2002.86.12.1396
8. Gordon R.E., Barnett D.A., Handerhan J.E., Pang C.H.-N. *Nocardia coeliaca*, *Nocardia autotrophica*, and the nocardin strain // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 1974. V. 24. No. 1. P. 54–63. doi: 10.1099/00207713-24-1-54
9. Bahriz H., Bouras N. Etude de la Maladie du Bayoud, le Comportement Variétal du Palmier Dattier vis-à-vis du *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* dans la Vallée du M'Zab // African Review of Science, Technology and Development. 2020. V. 5. No. 1. P. 41–60 (in French).
10. Benzohra I.E., Megateli M., Berdja R. Bayoud disease of date palm in Algeria: History, epidemiology and integrated disease management // African Journal of Biotechnology. 2015. V. 14. No. 7. P. 542–550. doi: 10.5897/AJBX2014.14292
11. Lamari L., Boudjella H., Bouras N., Sabaou N. Etude comparative des actinobactéries de la rhizosphère de deux cultivars de palmier dattier sensible et résistant au bayoud // Algerian Journal of Arid Environment. 2015. V. 5. No. 1. P. 3–17 (in French).
12. Mokrane S., Bouras N., Sabaou N., Mathieu F. Actinomycetes from saline and non-saline soils of Saharan palm groves: Taxonomy, ecology and antagonistic properties // African Journal of Microbiology Research. 2013. V. 7. No. 20. P. 2167–2178. doi: 10.5897/AJMR2013.5656
13. Rappilly F. Les techniques de mycologie en pathologie végétale. Paris: Institut national de la recherche agronomique, 1968. 102 p. (in French).
14. Lingappa Y. Chitin media for selective isolation and culture of actinomycetes // Phytopathology. 1962. V. 52. P. 317–323. doi: 10.1038/189158a0
15. Bergey's manual® of systematic bacteriology: V. 5. The Actinobacteria. Part A and B. / Eds. M. Goodfellow, P. Kämpfer, H.-J. Busse, M.E. Trujillo, K.I. Suzuki, W. Ludwig, W.B. Whitman. New York: Springer, 2012. 2083 p. doi: 10.1007/978-0-387-68233-4
16. Becker B., Lechevalier M.P., Gordon R.E., Lechevalier H. Rapid differentiation between *Nocardia*

- and *Streptomyces* by paper chromatography of whole-cell hydrolysates // *Applied Microbiology*. 1964. V. 12. No. 5. P. 421–423. doi: 10.1128/am.12.5.421-423.1964
17. Lechevalier M.P., Lechevalier H. Chemical composition as a criterion in the classification of aerobic actinomycetes // *International Journal of Systematic Bacteriology*. 1970. V. 20. No. 4. P. 435–443. doi: 10.1099/00207713-20-4-435
18. Minnikin D., Alshamaony L., Goodfellow M. Differentiation of *Mycobacterium*, *Nocardia*, and related taxa by thin-layer chromatographic analysis of whole-organism methanolysates // *Microbiology*. 1975. V. 88. No. 1. P. 200–204. doi: 10.1099/00221287-88-1-200
19. Luedemann G.M. Species concepts and criteria in the genus *Micromonospora* // *Transactions of the New York Academy of Sciences*. 1971. V. 33. No. 2. Series II. P. 207–218. doi: 10.1111/j.2164-0947.1971.tb02586.x
20. Nonomura H. Key for classification and identification of 458 species of the streptomycetes included in ISP // *Journal of Fermentation Technology*. 1974. V. 52. P. 78–92.
21. Shirling E.B., Gottlieb D. Cooperative description of type strains of *Streptomyces*: V. additional descriptions1 // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 1972. V. 22. No. 4. P. 265–394. doi: 10.1099/00207713-22-4-265
22. Goodfellow M. Numerical taxonomy of some noncardioform bacteria // *Microbiology*. 1971. V. 69. No. 1. P. 33–80. doi: 10.1099/00221287-69-1-33
23. Charif D., Lobry J.R. SeqinR 1.0-2: a contributed package to the R project for statistical computing devoted to biological sequences retrieval and analysis // *Structural Approaches to Sequence Evolution. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering* / Eds. U. Bastolla, M. Porto, H.E. Roman, M. Vendruscolo. Berlin: Springer, 2007. P. 207–232. doi: 10.1007/978-3-540-35306-510
24. Kassambara A., Mundt F. Package ‘factoextra’, Extract and visualize the results of multivariate data analyses [Internet resource] <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra> (Accessed: 30.12.2022).
25. Lê S., Josse J., Husson F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis // *Journal of Statistical Software*. 2008. V. 25. No. 1. P. 1–48. doi: 10.18637/jss.v025.i01
26. Wei T., Simko V. R package ‘corrplot’: Visualization of a correlation matrix. (Version 0.92) [Internet resource] <https://github.com/taiyun/corrplot> (Accessed: 30.12.2021).
27. Belarbi-Halli R., Mangenot F. Bayoud disease of date palm: ultrastructure of root infection through pneumatodes // *Canadian Journal of Botany*. 2011. V. 64. No. 8. P. 1703–1711. doi: 10.1139/b86-228.
28. Belarbi-Halli R., Dexheimer J., Mangenot F. Le pneumatode chez *Phoenix dactylifera* L. Structure et ultrastructure // *Canadian Journal of Botany*. 1983. V. 61. No. 5. P. 1367–1376. doi: 10.1139/b83-146 (in French).
29. Basil A.J., Strap J.L., Knotek-Smith H.M., Crawford D.L. Studies on the microbial populations of the rhizosphere of big sagebrush (*Artemisia tridentata*) // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2004. V. 31. No. 6. P. 278–288. doi: 10.1007/s10295-004-0140-y
30. Amir H., Bennaceur M., Laoufi Z., Amir A., Bounaga N. Le palmier dattier et la fusariose. XIII: Contribution à l’étude de l’écologie microbienne du sol de 2 palmeraies sahariennes atteintes de Bayoud // *Revue d’Ecologie et de Biologie du Sol*. 1985. V. 22 No. 3. P. 313–330 (in French).
31. Prauser H. *Nocardioides*, a new genus of the order Actinomycetales // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 1976. V. 26. No. 1. P. 58–65. doi: 10.1099/00207713-26-1-58
32. Belarbi-Halli R., Mangenot F. Bayoud disease of date palm: ultrastructure of root infection through pneumatodes // *Canadian Journal of Botany*. 1986. V. 64. No. 8. P. 1703–1711. doi: 10.1139/b86-228
33. Vaissie P., Monge A., Husson F. Factoshiny: perform factorial analysis from FactoMineR with a shiny application // R package version. 2015. V. 1 [Internet resource] <http://factominer.free.fr/graphs/factoshiny.html> (Accessed: 30.12.2021).

Экологический тренд сукцессии микобиома в чернозёме старого ботанического сада

© 2022. И. Д. Свистова¹, д. б. н., профессор,
Н. Н. Назаренко², к. б. н., доцент,

¹Воронежский государственный педагогический университет,
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 86,

²Воронежский государственный аграрный университет,
394087, Россия, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1,
e-mail: talalajko@mail.ru

В статье представлены результаты многолетних биоиндикационных исследований микобиома чернозёма выщелоченного старого ботанического сада имени Б.А. Келлера Воронежского государственного аграрного университета. Приводится общий список видов почвенных микромицетов, представленный 45 видами, относящимися к 3 классам, 5 семействам и 22 родам. Преобладающей являлась группа несовершенных грибов класса Deuteromycetes (39 видов). Семейство Moniliaceae представлено 9 родами, семейство Dematiaceae – 8 родами, а семейство Tuberculariaceae – 1 родом. Впервые установлен экологический тренд сукцессии микобиома чернозёма ботанического сада. Сукцессия почвенных грибов проявлялась в перегруппировке типичных видов, снижении доли случайных стенопотных видов, накоплении копитрофов, гидролитиков, фитопатогенов и токсигенных видов. Был выбран чувствительный метод определения биологической (фитотоксической) активности почвы и подтверждена решающая роль микромицетов как биотического фактора в её развитии. Стрессовая реакция микобиома и рост фитотоксической активности почвы свидетельствуют о важной роли микробно-растительных взаимодействий в снижении устойчивости даже такого высокобуферного типа почв, как чернозём выщелоченный.

Ключевые слова: почвенные микромицеты, биоразнообразие, таксономическая структура, биоиндикация, фитотестирование.

Ecological trend of succession in mycobiome of the old botanical garden chernozem

© 2022. I. D. Svistova¹ ORCID: 0000-0003-0275-5645¹
N. N. Nazarenko² ORCID: 0000-0002-6309-2219²
¹Voronezh State Pedagogical University,
86, Lenina St., Voronezh, Russia, 394043,
²Voronezh State Agrarian University,
1, Michurina St., Voronezh, Russia, 394087,
e-mail: talalajko@mail.ru

The article presents the results of long-term bioindication studies of the mycobiome of the leached chernozem of the B.A. Keller Botanical Garden of the Voronezh State Agrarian University. In this article, for the first time in our long-standing bioindication studies, we established the ecological trend of the succession of soil mycobiome of the Botanical Garden. The influence of plant rhizodeposits led to an increase in the α - and β -diversity of mycobiome compared to virgin soil, the accumulation of copiotrophic, hydrolytic, phytopathogenic species. However, the transition of soil mycobiome to the adaptive response of "stress" is observed, what appeared in the concentration of dominance of typical species, a decrease in the proportion of stenotopic species and the accumulation of toxigenic micromycetes. A sensitive method was selected for determining the biological (phytotoxic) activity of the soil, and the decisive role of micromycetes as a biotic factor in its development was confirmed. The main direction of succession of the soil mycobiome under intense microbial-plant interactions is the accumulation of species of fungi that synthesize mycotoxins. The stress reaction of the mycobiome and the growth of phytotoxic activity of the soil indicate the important role of microbial-plant interactions in reducing the stability of even such a high-buffer type of soil as leached chernozem. The results obtained can be used to assess and predict the ecological state of soil ecosystems using mycoindication.

Keywords: soil micromycetes, biodiversity, taxonomic structure, mycoindication, phytotesting.

Микроскопические грибы (микромитеты) играют важную роль в экосистемах, они минерализуют в почве биополимеры растительной мортмассы и являются основными редуцентами, замыкая циклы биогенных элементов [1]. Некоторые виды почвенных микромитетов проявляют фитопатогенные свойства [2, 3]. Накопление микотоксинов в почве является биотическим фактором развития почвоутомления [4, 5]. Географические и экологические факторы природных зон определяют специфический состав комплекса микромитетов (микобиома) разных типов почв и его сезонную динамику [6]. Важную роль играет также видовой состав конкретного фитоценоза; установлено, что прижизненные растительные ризодепозиты и растительный опад формируют видовой состав почвенных микромитетов [7–9].

Старый ботанический сад (создан в 1916 г.), названный именем известного ботаника Бориса Александровича Келлера, расположен на территории студенческого городка Воронежского государственного аграрного университета, является памятником природы, имеет научное значение, используется как рекреационная зона. В саду высажены 30 основных видов местной флоры: каштан конский *Aesculus hippocastanum* L., клён ясенелистный *Acer negundo* L., клён остролистный *A. plantanoides* L., акация белая *Robinia pseudoacacia* L., вяз шершавый *Ulmus pumila* L., тополь пирамидальный *Populus italica* Münchh., тополь бальзамический *P. balsamifera* L., дуб черешчатый *Quercus rubrum* L., липа мелколистная *Tilia cordata* Mill., сосна обыкновенная *Pinus silvestris* L., сирень обыкновенная *Syringia vulgaris* L. и др. Кроме того, интродуцированы более 40 видов древесных растений – экзотов, в том числе бархат амурский *Phellodendron amurense* Rupr., аралия манчжурская *Aralia elata* Seem., багряник японский *Cercidiphillum japonicum* Zuss., гинкго билоба *Ginkgo biloba* L. и др. По нашему мнению, многолетнее произрастание местных видов деревьев и интродуцентов в фитоценозе могло привести к изменению биологической активности почвы ботанического сада.

Актуальность исследования почвенного покрова ботанических садов обусловлена необходимостью выявления информативных параметров микоиндикации для оценки и прогнозирования экологического состояния почвы, подверженной антропогенному воздействию.

Цель работы – изучение многолетней биодинамики микобиома и выяснение экологического тренда микробной сукцессии в чернозёме старого ботанического сада.

Объекты и методы исследования

Вся территория проведения исследования находится в рекреационной зоне Центрального района г. Воронежа в пределах студенческого городка Воронежского государственного аграрного университета. Объектами исследования послужили два участка: ботанический сад им. Б.А. Келлера и контрольный участок на удалении 200 м от территории ботсада (опытные поля агроуниверситета), на котором удаляли растительность в течение вегетационного сезона.

Почвы исследуемых участков имеют одинаковые агрохимические показатели – чернозём выщелоченный малогумусный среднесуглинистый (гумус 4,4–5,2%, рН_{водн.} 6,0–6,2, рН_{сол.} 5,5–5,7, Нг 2,4–3,1 мг · экв/100 г, степень насыщенности катионами 74–80%).

Древесную растительность на территории ботсада представляют растения примерно 50–80-летнего возраста высотой до 12 м с диаметром стволов 27–55 см. В составе травяного покрова доминируют рудеральные злаки и разнотравье; площадь проективного покрытия составляет от 15 до 65%.

На выбранных участках отбирали 15 проб методом конверта из верхнего слоя почвы (0–20 см), анализировали смешанные образцы. Исследования проводили трижды за вегетационный период в течение трёх лет (2017–2019 гг.).

Микромитеты выделяли методом серийных разведений и посева почвенной суспензии на среду Чапека [10]. Численность микромитетов выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) в 1 г сухой почвы. Все опыты проведены в 5 биологических повторах.

Анализ разнообразия микроскопических грибов выполнен на основе культурально-морфологических признаков с использованием классических определителей для конкретной таксономической группы [11–15]. Наименование видов и систематическое положение дано по базе данных «Index Fungorum». Виды микромитетов считали токсигенными [16] и фитотоксичными [17] согласно предложенным спискам для чернозёмов. Эколого-физиологические стратегии грибов (копиотрофы, гидролитики, олиготрофы) установлены нами ранее на примере изолятов из чернозёмов [18].

Таксономическую структуру микобиома определяли по критериям пространственной и временной частоты встречаемости и плотности (обилия видов) [19]. Типичными считали виды грибов с частотами встречаемости более 30%, остальные виды – случайные. К рангу доминантов относили виды грибов с частотами встречаемости более 60%, к рангу часто встречающихся – с временной встречаемостью более 60%, а пространственной встречаемостью более 30%, к рангу редких – с частотами встречаемости до 30%. Показатели видового разнообразия почвенных микобиомов рассчитывали по плотности (доли, в %) изолятов [19].

Экологическую структуру оценивали на основании различных индексов. Для оценки α -разнообразия микобиома использовали индексы разнообразия Шеннона и доминирования Симпсона [20]. Для оценки β -разнообразия комплексов использовали индекс Сьёренсена, который позволяет сравнить степень сходства в видовом составе двух сообществ [21].

Для оценки экологического состояния почв использовали градации (адаптивные зоны), характеризующие состояние микробных сообществ в зависимости от интенсивности действия внешнего фактора на почвенные экосистемы [22]. Градации для разделения применяли следующие: зона гомеостаза микробной системы почвы характеризуется составом и количественным соотношением видов практически неотличимым от контрольного; зона стресса – перераспределение типичных видов микромицетов по частотам встречаемости; зона резистентности – смена видового состава и появление нехарактерных видов.

Фитотоксичность почвы определяли методом биотестов на почвенных пластинках [23], тест-растение – редис (*Raphanus sativus* L.). Оценивали степень ингибирования всхожести семян и роста корня проростка. Критерием токсичности считали достоверные различия с контролем, превышающие 20%.

Полученные данные обрабатывали стандартными методами статистического анализа с использованием пакета программы Microsoft Office Excel – Synecol. В таблицах данные представлены как средние \pm стандартная ошибка. Достоверность различий оценивали по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Всего в ранге типичных из чернозёма выщелоченного было выделено 45 видов

микромицетов, относящихся к 3 классам, 5 семействам и 22 родам. При составлении таксономических списков традиционно в почвенной микологии принято называть виды по тем стадиям, в которых они выделяются из почвы (табл. 1).

Преобладали несовершенные грибы класса Deuteromycetes (39 видов). Сем. Moniliaceae (бесцветный мицелий) и сем. Dematiaceae (тёмный мицелий) представлены 9 и 8 родами соответственно, сем. Tuberculariaceae (многоклеточные конидии) и группа со стерильным мицелием – по 1 роду. Наибольшим видовым разнообразием характеризовался род *Penicillium* (10 видов), представители которого являются типичными сапротрофами [16].

Видовая структура микобиома на двух участках заметно различалась. Из контрольной почвы без растений в ранге типичных было выделено 13 видов микромицетов (табл. 2), ещё 13 видов относились к случайным, выделялись с низкой частотой. Видовой состав и структура почвы в контроле соответствовала данным других исследований по чернозёмным почвам [1, 24].

По эколого-физиологической стратегии в почве контрольного варианта преобладали медленно растущие олиготрофные виды грибов. Доминирующие виды *Paec. lilacinum*, *Acr. alternatum*, *P. tardum*, *A. terreus*, *P. daleae* и *Ceph. acremonium* известны как стенотопные – индикаторы почв степной зоны. Большинство типичных видов относятся к термофильным и ксерофильным.

Из почвы ботанического сада нами выделены в ранге типичных 22 вида грибов. Ещё 19 видов микромицетов относились к случайным для данной экосистемы. В целом, видовое разнообразие почвенных грибов чернозёма ботсада оказалось в 1,5 раза выше, чем на контрольных окрестных территориях. Причиной этого, по нашему мнению, является тот факт, что климаксовая растительная ассоциация поставляет в почву разнокачественные прижизненные ризодепозиты и растительные остатки, которые разлагаются многими видами микромицетов. Свой вклад вносит и изменение микроклимата, под пологом деревьев влажность почвы выше, и повышается микроразнообразие в распределении мицелия грибов в ризосфере разных растений [6].

Комплекс типичных видов грибов в чернозёме ботанического сада также включает в себя эвритопные виды в ранге доминантов: *Penicillium tardum*, *P. expansum*, *P. simplicissimus*, *Paec. lilacinum*. Однако состав типичных видов

Таблица 1 / Table 1

Общий список видов почвенных микромицетов, выделенных из чернозёма выщелоченного
General list of types of soil micromycetes isolated from leached chernozem

Класс / Class	Семейство / Family	Род / Genus	Вид / Species	
Zygomycetes	Mucoraceae	<i>Mucor</i>	<i>hiemalis</i> Wehmer	
			<i>miehei</i> Cooney et Emerson	
			<i>ramosissimus</i> Samutsevitch	
		<i>Rhizopus</i>	<i>stolonifer</i> (Ehrenb. Ex Link) L.	
Ascomycetes	Trichocomataceae	<i>Talaromyces</i>	<i>flavus</i> * (Klocker) Stolk et Sams	
Deuteromycetes	Moniliaceae	<i>Acremonium</i>	<i>alternatum</i> Lk. ex Fries	
		<i>Aspergillus</i>	<i>candidus</i> Link	
			<i>clavatus</i> * Desmaz.	
			<i>alliaceus</i> Thom. et Church.	
			<i>ochraceus</i> * Wilhelm	
			<i>fischeri</i> * Thom. et Church	
			<i>niger</i> * V. Tiegh.	
			<i>ustus</i> * (Bain) Thom. et Church.	
			<i>terreus</i> * Thom.	
		<i>wentii</i> * Wehmer		
		<i>Botrytis</i>	<i>cinerea</i> Persoon ex Fries	
		<i>Cephalosporium</i>	<i>acremonium</i> Corda	
		<i>Gliocladium</i>	<i>virens</i> * Miller, Giddens et Fost	
		<i>Paecilomyces</i>	<i>lilacinum</i> Thom.	
		<i>Penicillium</i>	<i>simplicissimus</i> (Oud.) Thom.	
			<i>daleae</i> Zaleski	
			<i>restrictum</i> * Gilb. et Abb.	
			<i>tardum</i> Thom.	
			<i>canescens</i> Sopp.	
			<i>lanosum</i> Westling	
			<i>funiculosum</i> * Thom.	
			<i>viridicatum</i> * Westling	
			<i>janthinellum</i> Biourge	
			<i>notatum</i> * West.	
		<i>Trichoderma</i>	<i>koningii</i> * Oudem	
			<i>pseudokoningii</i> * Rifai	
			<i>harzianum</i> * Rifai	
			<i>album</i> Preuss	
		<i>Sporotrichum</i>	<i>piluliferum</i> Link et Fries	
		Dematiaceae	<i>Alternaria</i>	<i>alternata</i> * Ness.
			<i>Botryotrichum</i>	<i>piluliferum</i> Sacc. et March.
			<i>Drechslera</i>	<i>sorokiniana</i> Sacc. Subram
			<i>Humicola</i>	<i>grisea</i> Traaen
			<i>Stachybotrys</i>	<i>chartarum</i> * (Ehrenb.) Hugnes
			<i>Cladosporium</i>	<i>herbarum</i> (Pers.) Link
			<i>Stemphyllium</i>	<i>botryosum</i> Wallr.
			<i>Aureobasidium</i>	<i>pullulans</i> (DB) Arnaud.
Tuberculariaceae	<i>Fusarium</i>	<i>solani</i> * (Mart) Appl.		
		<i>oxysporum</i> * Snyd et Hans		
Mycelia sterilia		<i>Rhizoctonia</i>	<i>solani</i> * Kuhn.	

Примечание: * – токсигенные виды [16].
Note: * – toxigenic species [16].

Таблица 2 / Table 2

Влияние фитоценоза на структуру комплекса типичных микромицетов чернозёма выщелоченного
Influence of phytocenosis on the structure of the complex of typical micromycetes of leached chernozem

Ранг видов Species rank micromycetes	Контроль Control	Ботанический сад Botanical garden	
Доминанты / Dominants	<i>Paec. lilacinum</i>	<i>Paec. lilacinum</i>	
	<i>Acr. alternatum</i>	<i>P. simplicissimus</i>	
	<i>P. tardum</i>		<i>P. tardum</i>
			<i>P. expansum</i>
			<i>T. koningii</i>
			<i>C. acremonium</i>
			<i>Acr. alternatum</i>
<i>F. solani</i>			
Частые / Frequent	<i>Tr. koningii</i>	<i>A. candidus</i>	
	<i>P. daleae</i>	<i>H. grisea</i>	
	<i>A. terreus</i>		<i>A. ustus</i>
			<i>G. virens</i>
			<i>B. cinerea</i>
			<i>S. piluliferum</i>
			<i>Ch. piluliferum</i>
<i>Alt. alternata</i>			
Редкие / Rare	<i>F. oxysporum</i>	<i>P. funiculosum</i>	
	<i>F. solani</i>	<i>Rh. stolonifer</i>	
	<i>Ch. piluliferum</i>	<i>A. wentii</i>	
	<i>P. funiculosum</i>	<i>A. alliaceus</i>	
	<i>P. simplicissimus</i>	<i>Tal. flavus</i>	
	<i>M. hiemalis</i>	<i>Rhiz. solani</i>	
	<i>C. acremonium</i>		

микобиома расширился и заметно менялся по экологической стратегии за счёт быстрорастущих грибов сем. Mucoraceae, а также активных гидролитиков – целлюлолитических грибов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Sporotrichum*, *Humicola* и *Stachybotrys*. К осени возрастала доля лигнолитических грибов родов *Sporotrichum*, *Aureobasidium* и *Chaetomium*.

Также отмечен рост частоты встречаемости факультативных фитопатогенов. К ним относятся виды микромицетов *Cladosporium herbarum*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea*, *Mucor hiemalis*, *Fusarium* spp., которые в контрольной почве без растений были случайными.

Наряду с ростом видового богатства и индекса разнообразия Шеннона, в почве ботанического сада проявлялась «концентрация доминирования» за счёт снижения плотности случайных видов (табл. 3).

Небольшие значения индекса доминирования и примерно равная плотность как типичных, так и случайных видов в контрольном участке без растений обеспечивает функциональную стабильность микробного

комплекса, что соответствует адаптивной зоне «гомеостаза» [22]. Обнаруженные изменения в микобиоме почвы ботанического сада по сравнению с контролем (перегруппировка по степени доминирования) соответствуют адаптивной зоне «стресса». Коэффициент Съеренсена равен 0,7 и указывает на среднюю степень сходства микобиомов почвы ботсада и контрольной почвы.

Установлено, что на территории ботанического сада фитотоксическая активность почвы значительно превышает контрольный уровень (табл. 4). Этот интегральный показатель отражает суммарное влияние как загрязняющих веществ, так и биологических факторов на рост и развитие растений. Превышение фитотоксической активности в 2 раза в почве ботанического сада соответствует росту численности грибных зачатков и суммарной плотности видов грибов, способных к синтезу микотоксинов (табл. 1 и 4).

Ранее нами было показано, что микотоксины выделенных изолятов типичных видов почвенных грибов проявляют широкий спектр

Таблица 3 / Table 3

Показатели видового разнообразия микобиома чернозёма без растений и под фитоценозом ботанического сада / Indicators of the species diversity of the mycobioma of chernozem without plants and under the phytocenosis of the botanical garden

Показатели Indicators	Контроль Control	Ботанический сад Botanical garden
Общее количество видов Total number of species	26	41
Количество типичных видов Number of typical species	13	22
Суммарная плотность типичных видов, % Percentage of typical species, %	43	67
Суммарная плотность случайных видов, % Share of typical types of, %	57	33
Индекс разнообразия Шеннона Shannon diversity index	2,9	3,8
Индекс доминирования Симпсона Simpson's dominance index	0,19	0,09
Коэффициент сходства Сьёренсена The coefficient of similarity of Sørensen	1,0	0,7

Таблица 4 / Table 4

Вклад биогенного фактора в фитотоксическую активность чернозёма выщелоченного
The contribution of the biogenic factor to the phytotoxic activity of leached chernozem

Показатели / Indicators	Контроль Control	Ботанический сад Botanical garden
Ингибирование всхожести семян тест-растения, % Germination inhibition seed test plants, %	3,6±0,5	4,8±1,2
Ингибирование роста корня проростка тест-растения, % Root growth inhibition test plants, %	6,5±0,7	12,1±0,8*
Численность микромицетов, тыс. КОЕ/г почвы The number of micromycetes, thousand CFU/g soil	28±5	48±6*
Плотность токсигенных видов микромицетов, % Density of toxigenic species micromycetes, %	13±5	27±9*

Примечание: * – статистически достоверные различия с контролем, погрешность измерения 5%.
Note: * – statistically significant differences with the control, the measurement error is 5%.

токсического действия (антибиотического, фунгицидного, фитотоксического) [4]. По нашему предположению, возрастание доли токсигенных видов в почве отражает обостряющуюся конкурентную борьбу микромицетов за пищевые ресурсы в условиях воздействия лимитирующего фактора, например, дефицита элементов минерального питания. Фитотоксическая активность почвы ботсада не достигла принятых пороговых значений санитарного неблагополучия (20%), но достоверные различия с контрольными показателями указывают на негативную тенденцию и необходимость мониторинга развития почвоутомления.

Заключение

Высокое видовое разнообразие растений местной флоры и интродуцентов старого бо-

танического сада вызывает специфическую грибную сукцессию в почве. Основные черты сукцессии микобиома – рост численности грибов, перегруппировка по степени доминирования типичных для чернозёма выщелоченного стенотопных видов, возрастание α - и β -разнообразия и «концентрация доминирования» с одновременным снижением доли случайных видов по сравнению с контрольной почвой без растений.

В прикорневой зоне растений накапливаются специфические эколого-физиологические группы микромицетов: копиотрофы, гидролитики и фитопатогены. К негативным последствиям грибной сукцессии в почве ботсада относится рост фитотоксической активности почвы, важный вклад в этот процесс вносит микробный фитотоксикоз за счёт накопления токсигенных видов грибов.

Подобный экологический тренд микробиома на влияние фитоценоза старого ботанического сада соответствует адаптивной зоне «стресса» [22] и свидетельствует о важной роли микробно-растительных взаимодействий в снижении устойчивости даже такого высокобуферного типа почв, как чернозём. Полученные результаты могут быть использованы при микоиндикации для оценки и прогнозирования экологических ситуаций в городских рекреационных зонах.

References

1. Fierer N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome // *Nature Reviews Microbiology*. 2017. No. 10. P. 579–590. doi: 10.1038/nrmicro.2017.87
2. Berendsen R.L., Pieterse C.M., Bakker P.A. The rhizosphere microbiome and plant health // *Trends in Plant Science*. 2012. No. 8. P. 478–486. doi: 10.1016/j.tplants.2012.04.001
3. Mueller U.G., Sachs J.L. Engineering microbiomes to improve plant and animal health // *Trends in Microbiology*. 2015. P. 606–617. doi: 10.1016/j.tim.2015.07.009
4. Svistova I.D., Frolova L.O., Shcherbakov A.P. Phytotoxic activities of chernozem saprotrophic micromycetes: specificity, sorption and stability of phytotoxins in soil // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2003. No. 4. P. 388–392 (in Russian). doi: 10.1023/A:1024520618388
5. Saul-Tcherkas V., Steinberger Y. Soil microbial diversity in the vicinity of desert shrubs // *Microbial Ecology*. 2013. No. 3. P. 689–699. doi: 10.1007/s00248-012-0141-8
6. Tropina O.V., Terekhova V.A., Semenova T.A. Variability of the structure micromycetes complexes because of the heterogeneity of soil // *Mikologiya i fitopatologiya*. 2003. V. 37. No. 6. P. 74–79 (in Russian).
7. Nazarenko N.N., Svistova I.D. Succession of micromycetes and biological activity of chernozem in monocultures of essential oil bearing plants of the Lamiaceae family // *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2013. No. 4. P. 43–46 (in Russian).
8. Shirokikh A.A., Kolupaev A.V. Fungi in bio-monitoring of terrestrial ecosystems // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 3. P. 4–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-004-014
9. Svistova I.D., Kuvshinova N.M., Nazarenko N.N. Microbial-plant associations of nontraditional sugar carriers and producers of natural sweeteners // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 3. P. 41–47 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-3-041-047
10. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Workshop on microbiology. Moskva: Drofa, 2004. 256 p. (in Russian).
11. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of soil fungi. Eching: IWH-Verlag, 2007. 672 p.
12. Bilay V.I., Koval E.Z. Aspergilly. Qualifier. Kiev: Naukova dumka, 1988. 204 p. (in Russian).
13. Rifai M.A. A revision of the genus *Trichoderma* // *Mycol. Paper*. 1969. V. 116. P. 1–56.
14. Kirilenko T.S. Key to soil marsupial fungi. Kiev: Naukova dumka, 1978. 263 p. (in Russian).
15. Milko A.A. Key to mucoral fungi. Kiev: Naukova dumka, 1974. 303 p. (in Russian).
16. Bilay V.I., Pidoplichko N.M. Toxin-producing microscopic fungi. Kiev: Naukova dumka, 1970. 246 p. (in Russian).
17. Svistova I.D., Shcherbakov A.P., Frolova L.O. Phytotoxic activity of saprophytic micromycetes of chernozem: specificity, sorption and stability of phytotoxins in soil // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2003. No. 4. P. 441–445 (in Russian).
18. Svistova I.D. Chernozem micromycetes – producers of cellulolytic enzymes. Voronezh: VGU, 2003. 152 p. (in Russian).
19. Mirchink T.G. Soil mycology. Moskva: MGU, 1988. 220 p. (in Russian).
20. Megarran E. Ecological diversity and its measurement. Moskva: Mir, 1992. 184 p. (in Russian).
21. Odum Yu. Ecology. Moskva: Mir, 1986. 325 p. (in Russian).
22. Guzev V.S., Levin S.V. Prospects for ecological and microbiological expertise of soil condition under anthropogenic impacts // *Pochvovedenie*. 1991. No. 9. P. 50–61 (in Russian).
23. Svistova I.D. Methodological approaches to the determination of phytotoxic activity of soil and soil microorganisms // *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2019. No. 2. P. 40–46 (in Russian). doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5
24. Svistova I.D., Stakhurlova L.D. Dynamics of the typical Chernozems' properties in the Streletskaaya steppe national park under the influence of long-term agrogenic impact // *Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka*. 2018. No. 4. P. 40–42 (in Russian). doi: 10.31857/S250026270000567-8

Снежные водоросли и цианобактерии ряда районов Урала и Западного Саяна

© 2022. И. В. Новаковская¹, к. б. н., н. с.,
Е. Н. Патова¹, к. б. н., в. н. с.,
Е. Г. Макеева², к. б. н., с. н. с.,

¹Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Государственный природный заповедник «Хакасский»,
655017, Россия, г. Абакан, а/я 189,

e-mail: novakovskaya@ib.komisc.ru, patova@ib.komisc.ru, meg77@yandex.ru

Исследовано видовое разнообразие водорослей и цианобактерий на горных склонах северных регионов Урала и Западного Саяна в местах «цветения» снега с красным, коричневым и чёрным окрашиванием. Площадь таких снежников варьировала от 50 до 45000 м². В среднем на поверхности снега 1 см² отмечено 17,6–142,4 тыс. клеток. Всего выявлено 29 видов из 5 отделов, преобладают одноклеточные коккоидные зелёные водоросли. Основными видами, вызывающими красное «цветение» снега, являются *Chloromonas reticulata* и *Chlamydomonas proteus*. Высокую частоту встречаемости в пробах снега также имели cf. *Xerochlorella minuta* и *Stichococcus* cf. *bacillaris*. Талая вода снежников в местах активного развития водорослей и цианобактерий характеризуется слабкокислой реакцией среды, низкой электропроводностью и невысоким содержанием основных биогенных элементов.

Ключевые слова: разнообразие снежных водорослей и цианобактерий, Полярный, Приполярный и Северный Урал, Западный Саян, химический состав снега.

Snow algae and cyanobacteria in several regions of the Urals and the Western Sayan

© 2022. I. V. Novakovskaya¹ ORCID: 0000-0001-5056-9965[†]

E. N. Patova¹ ORCID: 0000-0002-9418-1601[†], E. G. Makeeva² ORCID: 0000-0002-2445-2429[†]

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

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

²Khakassky State Nature Reserve,

PO Box 189, Abakan, Russia, 655017,

e-mail: novakovskaya@ib.komisc.ru, patova@ib.komisc.ru, meg77@yandex.ru

We studied the species diversity of algae and cyanobacteria on the colored snow surface (red, brown and black) of mountain slopes in the northern regions of the Urals (Polar, Subpolar and Northern Urals) and Western Sayan (the eastern part of the State Nature Reserve “Pozarym named after V.M. Zimin”). The area of the snow patches was 50–45,000 m². In average, 17.6–142.4 thousand algal and cyanobacteria cells were found on the 1 cm² of the snow surface. We identified 29 algal and cyanobacteria species from five divisions (Cyanobacteria – 1, Bacillariophyta – 1, Ochrophyta – 3, Chlorophyta – 21, Charophyta – 3). Unicellular coccoid green algae predominate. Most of the identified species are widespread in terrestrial and aquatic ecosystems. They are able to vegetate under conditions of low temperatures and high solar radiation. *Chloromonas reticulata* (Gorozh.) Gobi and *Chlamydomonas proteus* E.G. Pringsh. are main sources of the red bloom of the snow patches. These species were found during direct visual inspection of snow samples in the field. Species cf. *Xerochlorella minuta* (J.B. Petersen) Mikhailuk & P.M. Tsarenko and *Stichococcus* cf. *bacillaris* Nägeli also had a high frequency of occurrence in the snow samples, but these species were found in laboratory conditions when cultivating on nutrient media. We also studied chemical indicators in places of mass development of algae and cyanobacteria, including: pH, conductivity, color, chemical oxygen demand (COD), permanganate value (PV), N_{total}, P_{total}, C_{total}, C_{inorg.}, C_{org.}, a number of macro and micro elements. The melted snow is characterized by a slightly acidic pH, low electrical conductivity and low content of the main biogenic elements.

Keywords: diversity of snow algae and cyanobacteria, Polar, Subpolar and Northern Urals, Western Sayan, chemical composition of snow.

Водоросли и цианобактерии (ЦБ) снега и льда – это организмы, которые могут существовать в экстремальных условиях при очень низких температурах и их резких колебаниях. Они способны переносить недостаток или избыток света в течение длительного времени, выдерживать сильное ультрафиолетовое облучение [1–2]. Известно более 300 видов и разновидностей снежных водорослей и ЦБ, среди них преобладают Cyanobacteria и Chlorophyta [3–4]. В зависимости от степени адаптации криофильные водоросли и ЦБ подразделяют на психрофильные (облигатные криофилы), растут только при низких температурах и погибают при повышении температуры выше определённого порога (t_{\min} около 0°C , $t_{\text{opt.}} \leq 15^{\circ}\text{C}$ и $t_{\max} = 15\text{--}20^{\circ}\text{C}$). К таким видам относятся большинство водорослей и ЦБ снега и льда. Виды, предпочитающие более высокие температуры, относятся к психротолерантным (необлигатные криофилы). В основном это виды из вечной мерзлоты и альпийских почв ($t_{\min} > 0^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{opt.}} > 15^{\circ}\text{C}$) [5–6].

Благодаря наличию пигментов водоросли и ЦБ могут вызывать «цветение» снега различных оттенков. Выделяют: красное, жёлтое, зелёное, синее и фиолетово-коричневое «цветение» [3, 7–10]. Оттенок цвета зависит также от плотности популяции и стадии жизненного цикла, в которой находится организм [11]. Чаще других наблюдается красное «цветение» снега в результате накопления покоящимися клетками кето-каротиноида – астаксантина [5, 9, 12].

Криофильные водоросли и ЦБ представляют большой интерес для биотехнологии и промышленности, так как способны производить холодоактивные ферменты и белки, вещества, поглощающие УФ-излучение, антиоксиданты, омега-3 жирные кислоты и др. [6, 13–15].

В период глобальных изменений климата «цветению» водорослей и ЦБ уделяется повышенное внимание специалистов во всём мире, так как это явление оказывает огромное влияние на процессы круговорота органических веществ в природе и является одной из причин снижения общей площади снегового покрова северного и южного полюсов [2–3, 7–11, 16–17].

Изучение снежных водорослей и ЦБ – сложный и длительный процесс, отбор проб затруднён тем, что скопления снега находятся высоко в горах и труднодоступны. Несмотря на это, обследованы многие горные системы [4, 18]. В настоящее время активно развиваются

эколого-флористические и физиологические исследования водорослей снега и льда в различных высокогорных районах мира, Арктики и Антарктиды [3–5, 11, 16–17, 19–23].

«Цветение» снега ежегодно отмечается летом в северных районах Урала и Западного Саяна, однако изучение видового состава криофильных водорослей и ЦБ для данных территорий не проводилось.

Целью настоящей работы является изучение видового разнообразия снежных водорослей и ЦБ Урала (Полярный, Приполярный, Северный) и Саян (Западный), а также химических показателей снега, где было отмечено «цветение» этих организмов.

Объекты и методы исследования

На Полярном, Приполярном и Северном Урале сборы водорослей и ЦБ были выполнены в июле-августе 2011, 2012, 2016–2021 гг., на снежниках, где было отмечено «цветение» снега (табл. 1; рис. 1, см. цв. вкладку V). Снежник – неподвижное скопление снега в местах, защищённых от ветра и солнца, сохраняющееся после стаивания окружающего снежного покрова. Северные регионы Урала расположены на территории Республики Коми, Ямало-Ненецкого автономного округа и Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области. По геофизическим данным, фундамент Уральских гор преимущественно сложен метаморфическими и магматическими породами. Климат региона – резко континентальный, с длинной холодной зимой и коротким прохладным летом. Приполярный Урал – самая высокая часть в системе Уральского хребта (наивысшая точка – гора Народная, 1894,5 м) [24].

В горной системе Западного Саяна пробы были собраны в июне 2019 и 2021 гг. у подножия хребта Кохош, возле безымянного притока р. Большой Он (верхнее течение), в восточной части Государственного природного заказника «Позарым им. В.М. Зимина». Западный Саян – горная система в южной части Сибири. Исследования были проведены в районе северного макросклона Западного Саяна, на территории Хакасии, в высокогорном поясе, основное пространство которого занимает массивно-высокогорный рельеф, в пределах высот 1700–2000 м. Климат высокогорий континентальный, характеризуется продолжительной снежной зимой и коротким летом [25].

Площадь окрашенных участков снега определяли с помощью их оконтуривания

Таблица 1 / Table 1

Характеристика мест сбора проб снега
Characteristics of sites where snow samples were collected

№	Район, год сбора Region, year of sampling	Место сбора Sampling site	Высота над уровнем моря Height above sea level	Координаты Coordinates	Окраска снега Color of snow
Полярный Урал / Polar Urals					
1	г. Константинов Камень, 2011 Mount Konstantinov Kamen, 2011	снежник среди курумников snow patch among the screes	400	N 68°29'32,3" E 66°13'44,3"	красная red
Приполярный Урал / Subpolar Urals					
2	Хребет Малдынырд, 2019–2021 Ridge Maldynyrd, 2019–2021	снежник среди курумников snow patch among the screes	951	N 65°12'23" E 60°12'07"	красная red
Северный Урал / Northern Ural					
3	Верховье реки Тельпоз, 2018 Upper reaches of the Telpoz river, 2018	снежник на береговой полосе реки snow patch on the river bank	670	N 63°42'52,3" E 59°08'42,8"	красная red
4	Окрестности хребта Тельпозиз, 2018 Near Telpoziz ridge, 2018	снежник в берёзовом криволезье snow patch in a crooked birch forest	571	N 63°40'31,2" E 59°07'16,3"	красная red
5	Окрестности г. Пеленер, 2016, 2018 Near Mount Pelener, 2016, 2018	снежник на горной луговине snow patch on mountain meadow	706	N 63°22'52,7" E 58°55'22,8"	красная и коричневая red and brown
6	Окрестности г. Пеленер, 2016 Near Mount Pelener, 2016	снежник на разнотравно- злаковом лугу snow patch on forb- grass meadow	585	N 63°22'36,2" E 58°54'20,3"	красная и чёрная red and black
7	Окрестности г. Кузькудинер, 2016 Near Mount Kuzkudiner, 2016	снежник среди курумников snow patch among the screes	650	N 63°48'48,6" E 59°11'45,8"	красная red
Западный Саян / Western Sayan					
8	Подножие хребта Кохош, 2019, 2021 Foothill of the Cohosh ridge, 2019, 2021	снежник в лиственнично- кедровом лесу snow patch in larch- cedar forest	1782	N 51°44'59,82" E 89°50'4,68"	красная Red

с использованием навигатора **Garmin GPS-MAR 64st** (Китай). Пробы снега отбирали в местах «цветения» водорослей на глубину до 10 см в стерильные пластиковые пробирки объёмом 15 мл Greiner Bio-One (Австрия), а также в чашки Петри и пробирки с питательной средой 3N BBM и Bg 11 [26, 27].

Для выявления видового разнообразия и количественных показателей использовали

прямое микроскопирование собранного снега. Исследование выполнено в полевых условиях с помощью микроскопа Биолам Д-11. Для количественного учёта клеток водорослей и ЦБ отбирали снег рамкой площадью 5 см² на глубину до 5 см. Учёт проводили в день отбора пробы образцов прямым счётом клеток. Снег растапливали, отбирали 1 мл пробы, рассчитывали объём одной капли (1/26 мл), помещали

каплю на предметное стекло и проводили учёт клеток в препарате в пяти повторностях для каждого образца. Затем рассчитывали численность клеток на площадь 1 см².

Температуру снега в местах «цветения» определяли с помощью инфракрасного бесконтактного термометра Optris MiniSight (Германия). Для измерения электропроводности талой воды в полевых условиях использовали Hanna Water Test 98121 (Германия). Анализ остальных гидрохимических показателей (ионы, микроэлементы и др.) выполнен в экоаналитической лаборатории ИБ Коми НЦ УрО РАН.

В лабораторных условиях изучали разнообразие водорослей и ЦБ с использованием накопительных и монокультур. Для получения альгологически чистых культур применяли метод посева штрихом и изоляцию с помощью микропипетки [26, 27]. Выращивание водорослей и ЦБ проводили на жидкой и агаризованной средах 3N BBM и Vg 11. Для исследования штаммов использован микроскоп Nikon Eclipse 80i при увеличении до 1000 раз, оборудованного системой дифференциального интерференционного контраста и видеофиксации изображений. Идентификация видов проведена с привлечением отечественных и

Таблица 2 / Table 2

Химические показатели снега в местах массового развития снежных водорослей и цианобактерий
Chemical indicators of snow in places of mass development of snow algae and cyanobacteria

Показатель Parameter	Единицы измерения Units	Диапазон значений Value range
pH	ед. / units	5,3±0,5 – 6,0±0,6
Электропроводность Conductivity	мкСм/см / μS/cm	2,8±0,6 – 9,8±2,0
Цветность / Color	градусы / degrees	9±4 – 67±7
ХПК/ COD	мгО/дм ³ / mgO/dm ³	5,7±1,7 – 75±15
Перманганатная окисляемость Permanganate oxidizability	мгО/дм ³ / mgO/dm ³	0,65±0,13 – 4,2±0,4
N-NH ₄ ⁺		< 0,010 – 1,21±0,29
N-NO ₃ ⁻		<0,050
N _{общ.} / N _{total}		< 0,50 – 1,28±0,23
HCO ₃ ⁻		< 6,1
PO ₄ ³⁻		< 0,05 – 0,27±0,04
P _{общ.} / P _{total}		< 0,02 – 0,088±0,028
SO ₄ ²⁻		< 2,0
Cl ⁻		< 0,5 – 1,8±0,4
C _{общ.} / TC	мг/дм ³ / mg/dm ³	1,81±0,22 – 19,7±2,4
C _{неорг.} / IC		0,47±0,07 – 1,35±0,16
C _{орг.} / TOC		2,1±0,6 – 18,4±2,5
K		0,13±0,03 – 0,55±0,13
Ca		<0,050 – 0,31±0,08
Mg		<0,050 – 0,056±0,013
Na		0,051±0,012 – 0,62±0,15
Fe _{общ.} / Fe _{total}		<0,05
Si		< 0,05 – 0,099±0,024
Mn		< 1,0 – 8,9±2,8
Zn		< 5,0 – 17±6
Cu		< 1,0 – 2,6±0,8
Pb		< 4,0
Cd		< 0,2
Ni		
Co		< 1,0
Sr		

Таблица 3 / Table 3

Список водорослей и цианобактерий, выделенных с поверхности снега в северных регионах Урала и Западного Саяна / List of algae and cyanobacteria isolated from the snow surface in the northern regions of the Urals and the Western Sayan

Таксон Taxon	Полярный Урал Polar Urals	Приполярный Урал Subpolar Urals	Северный Урал Northern Urals	Западный Саян Western Sayan
Cyanobacteria				
<i>Pseudanabaena</i> sp.	–	–	5	–
Bacillariophyta				
<i>Navicula</i> sp.	–	–	–	8
Ochrophyta				
<i>Botrydiopsis eriensis</i> J. Snow	–	–	–	8
<i>Characiopsis acuta</i> (A. Braun) Borzi	–	–	–	8
<i>Xanthonema</i> sp.	–	–	–	8
Chlorophyta				
<i>Bracteacoccus giganteus</i> H.W. Bisch. et H.C. Bold	–	–	4	8
<i>Chlamydocapsa</i> sp.	–	–	5	–
<i>Chlamydomonas macrostellata</i> J.W.G. Lund	–	–	7	–
<i>Chlamydomonas proteus</i> E.G. Pringsh.	–	–	–	8
<i>Chlamydomonas</i> spp.	–	–	3,5	–
cf. <i>Chlamydomonium starrii</i> (Fott) H. Ettl et G. Gärtner	–	–	5	–
cf. <i>Xerochlorella minuta</i> (J.B. Petersen) Mikhailyuk & P.M. Tsarenko	–	2	5	8
<i>Chlorella vulgaris</i> Beij.	–	–	5	–
<i>Chlorococcum ellipsoideum</i> Deason & H.C. Bold	–	–	5	–
<i>Chloroidium saccharophilum</i> (W. Krüger) Darienko, Gustavs, Mudimu, Menendez, Schumann, Karsten, Friedl & Proschold	–	2	5	–
<i>Chloromonas reticulata</i> (Gorozh.) Gobi	1	2	3,6	8
<i>Elliptochloris bilobata</i> Tscherm.-Woess	–	2	–	–
<i>Fernandinella alpina</i> Chodat	–	–	–	8
<i>Fernandinella semiglobosa</i> (F.E. Fritsch & R.P. John) Škaloud & Leliaert	–	2	–	–
<i>Keratococcus bicaudatus</i> (A. Braun ex Rabenh.) J.B. Petersen	–	–	–	8
<i>Monoraphidium terrestre</i> (Bristol) Krienitz & Klein	–	–	5	–
<i>Pseudococcomyxa</i> sp.	–	–	5	8
<i>Scotinosphaera grandis</i> (Bristol) Wujek & R.H. Thomps.	–	–	–	8
<i>Spongiococcum tetrasporum</i> Deason	–	–	5	–
<i>Stichococcus</i> cf. <i>bacillaris</i> Nägeli	–	3	5	8
<i>Symbiochloris reticulata</i> (Tscherm.-Woess) Škaloud, Friedl, A. Beck & Dal Grande	–	–	7	–
Charophyta				
<i>Cosmarium saxicola</i> Kaiser	–	–	5	–
<i>Cylindrocystis</i> sp.	–	–	–	8
<i>Klebsormidium flaccidum</i> (Kütz.) P.C. Silva, Mattox & W.H. Blackwell	–	–	5	–

Примечание: цифры соответствуют номеру пробной площадки (табл. 1), знак «–» – вид не обнаружен.
Note: the numbers correspond to the sampling site number (see Table 1), “–” – species not found.

зарубежных определителей [27–29]. Таксономия и номенклатура водорослей и ЦБ приведены по AlgaeBase [30].

Сходство видового состава оценивали по коэффициенту Сьерёнсена, который рассчитывали при помощи программы ExStatR [31]. Для визуализации полученных результатов использовали представления в виде плеяды Терентьева.

Результаты и обсуждение

В горных системах Урала и Западного Саяна неподвижные скопления снега встречаются в субнивальном и горно-тундровом поясах. В результате выветривания моренных отложений из прилегающих ландшафтов на поверхности снега накапливается мельчайший пылевой материал (криоконит), содержащий почвенные частицы и споры водорослей и ЦБ. С повышением температуры на снежниках начинается активное снеготаяние, появляется жидкая вода, обогащённая питательными элементами из почвенных и пылевых частиц (табл. 2). Несмотря на слабокислую рН и низкую электропроводность талая вода содержит основные биогенные элементы, необходимые для активного развития водорослей и ЦБ, включая соединения азота, фосфора, углерода, а также кальций, магний, железо и ряд микроэлементов (табл. 2). На поверхности снега формируются благоприятные условия для развития снежных водорослей и ЦБ, обилие которых может достигать стадии «цветения». Наиболее часто на исследованной территории отмечали красное «цветение» снега, вызываемое представителями родов *Chloromonas* и *Chlamydomonas*. Для защиты от неблагоприятных условий клетки этих водорослей переходят в стадию инцистирования. В них под влиянием повышенного ультрафиолетового освещения в больших количествах накапливается красный пигмент – астаксантин, что вызывает окрашивание снега в местах их массового развития [5, 9, 12]. Площадь таких пятен может варьировать от 50 до 45 000 м² и более.

Насыщенность цвета окрашенного снега зависела от количества клеток на снежной поверхности, в среднем она составляла 17,6–142,4 тыс. кл./см². Основная масса клеток была сосредоточена в верхнем слое снега на глубине 0–5 см, максимальная глубина окрашенного снега была более 20 см.

«Цветение» водорослей и ЦБ может приводить к повышению температуры за счёт уменьшения альбедо поверхности снега и льда,

что ускоряет скорость их таяния [2–3, 7–11, 16–17]. На Приполярном Урале в момент отбора проб температура красного снега составила: на поверхности от -2,4 до -3,8 °С, чёрного – до -1,8 °С, на глубине 10 см температура снега была в диапазоне от -0,6 до -1,5 °С.

Всего в снежниках исследованных районов было обнаружено 29 видов из 5 отделов: Cyanobacteria – 1, Bacillariophyta – 1, Ochrophyta – 3, Chlorophyta – 21, Charophyta – 3 (табл. 3). Большая часть видов выявлена только культуральными методами, при прямом микроскопировании большинство из них не были отмечены. По таксономическому разнообразию преобладают одноклеточные зелёные водоросли. Многие из выявленных видов широко распространены в наземных и водных экосистемах и не вызывают «цветение» снега, но способны выживать на его поверхности при низких температурах и высокой солнечной радиации. В течение длительного времени они сохраняются на поверхности снега и льда в виде покоящихся клеток (акинет, апланоспор, зигот), которые при благоприятных условиях культивирования начинают активно развиваться. Как правило, в искусственных условиях культивируется лишь ограниченное число видов [32]. Большинство таксонов выделены в чистую культуру и содержатся в коллекции водорослей ИБ Коми НЦ УрО РАН (<http://ib.komisc.ru/sykoa/collection/225>).

Видовое разнообразие водорослей и ЦБ специфично для каждого района исследований

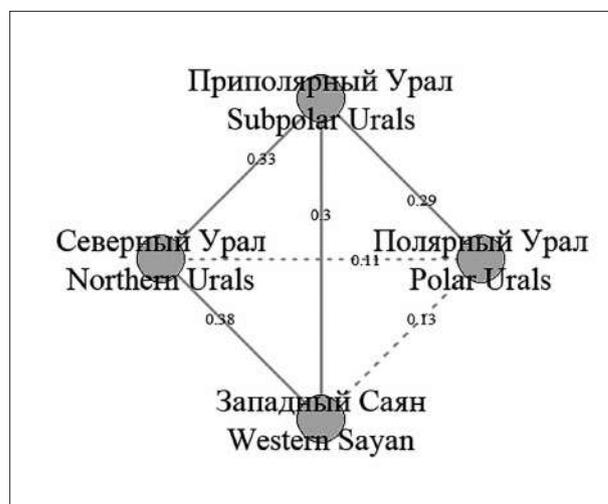


Рис. 2. Коэффициент сходства флористического состава снежных водорослей и цианобактерий, рассчитанный для разных регионов исследования, представлен в виде плеяды Терентьева

Fig. 2. The similarity graph between algae and cyanobacteria from different study regions presented in the form of the Terentyev Pleiad

(табл. 3). Коэффициент Сьёренсена подтверждает низкое сходство видового состава снежных водорослей и ЦБ, находится в диапазоне 11–38% (рис. 2), что связано с особенностями местообитания исследованных организмов.

В исследованных районах Урала и Саян при прямом микроскопировании выявлены виды из отдела Chlorophyta – *Chloromonas reticulata* и *Chlamydomonas proteus*, по-видимому, они и вызывают окрашивание снега в красный цвет. При культивировании на питательных средах высокую частоту встречаемости имели виды cf. *Xerochlorella minuta* и *Stichococcus* cf. *bacillaris*.

Заключение

В ходе исследования выявлено невысокое видовое разнообразие снежных водорослей и ЦБ (29 таксонов), что составляет не более 10% от общего числа криофильных видов мировой флоры [4, 18]. Видовой состав водорослей и ЦБ изученных снежников специфичен для каждого региона исследований и определяется его местоположением. Альгогруппировки окрашенного снега Урала и Западного Саяна сформированы видами толерантными к низким температурам. В природных образцах «цветущего» снега преобладают покоящиеся клетки водорослей и ЦБ, представленные акинетами, апланоспорами или зиготами. Для идентификации их видовой принадлежности необходима разработка специальных методических подходов с подбором питательных сред и условий культивирования. При подборе питательных сред необходимо учитывать особенности химического состава снега в местах массового развития водорослей и ЦБ. Как показали исследования, талая вода снежников характеризуется слабокислой реакцией среды, низкой электропроводностью и невысоким содержанием основных биогенных элементов. Полученные результаты дополняют представления о распространении и роли снежных водорослей и ЦБ в горных экосистемах Урала и Саян.

Работа выполнена в рамках государственного задания 122040600026-9. Благодарим за помощь в отборе проб, измерении площадей и изучении экологических показателей снега инженера ИБ Коми НЦ УрО РАН М. Д. Сивкова.

References

1. Mock T., Thomas D.N. Microalgae in polar regions: linking functional genomics and physiology with environ-

mental conditions. Chapter 17 / Ed. R. Margesin. Psychrophiles: from Biodiversity to Biotechnology. Heidelberg: Springer, 2008. P. 285–312. doi: 10.1002/9780470015902.a0023744

2. Hoham R.W., Remias D. Snow and glacial algae: a review // J. Phycol. 2020. No. 56. P. 264–282. doi: 10.1111/jpy.12952

3. Kawecka B. Ecology of snow algae // Polish Polar Research. 1986. V. 7. No. 4. P. 407–415.

4. Matsuzaki R., Kawat-Toyooka H., Hara Y., Nozaki H. Revisiting the taxonomic significance of aplanozygote morphologies of two cosmopolitan snow species of the genus *Chloromonas* (Volvocales, Chlorophyceae) // Phycologia. 2015. V. 54. No. 5. P. 491–502. doi: 10.2216/15-33.1

5. Hoham R.W., Duval B. Microbial ecology of snow and freshwater ice with emphasis on snow algae / Eds. H.G. Jones, J.W. Pomeroy, D.A. Walker, R.W. Hoham. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. P. 168–228.

6. Leya T. The CCCryo culture collection of cryophilic algae as a valuable bioresource for algal biodiversity and for novel, industrially marketable metabolites // Applied Phycology. 2020. P. 1–22. doi: 10.1080/26388081.2020.1753572

7. Hoffmann L. Algae of terrestrial habitats // Botanical Review. 1989. V. 55. No. 2. P. 77–105.

8. Ling H.U. Snow algae of the windmill Islands, continental Antarctica: *Desmotetra aureospora*, sp. nov. and *D. antarctica*, comb. nov. (Chlorophyta) // Journal of Phycology. 2001. V. 37. No. 1. P. 160–174. doi: 10.1046/j.1529-8817.2001.037001160.x

9. Komarek J., Nedbalová L. Green cryosestic algae / Ed. J. Seckbach. Algae and cyanobacteria in extreme environments. Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology. V. 11. Heidelberg: Springer, 2007. P. 321–342. doi: 10.1007/978-1-4020-6112-7_17

10. Muramoto K., Nakada T., Shitara T., Hara Y., Nozaki H. Re-examination of the snow algal species *Chloromonas miwae* (Fukushima) Muramoto et al., comb. nov. (Volvocales, Chlorophyceae) from Japan, based on molecular phylogeny and cultured material // European Journal of Phycology. 2010. V. 45. No. 1. P. 27–37. doi: 10.1080/09670260903272607

11. Davey M.P., Norman L., Sterk P., Huete-Ortega M., Bunbury F., Loh B.K.W., Stockton S., Peck L.S., Convey P., Newsham K.K., Smith A.G. Snow algae communities in Antarctica: metabolic and taxonomic composition // New Phytologist. 2019. No. 222. P. 1242–1255. doi: 10.1111/nph.15701

12. Leya T. Snow Algae: Adaptation strategies to survive on snow and ice / Eds. J. Seckbach, A. Oren, H. Stan-Lotter. Polyextremophiles: Life Under Multiple Forms of Stress. Heidelberg: Springer, 2013. P. 401–423. doi: 10.1007/978-94-007-6488-0_17

13. Leya T., Rahn A., L tz C., Remias D. Response of arctic snow and permafrost algae to high light and nitro-

gen stress by changes in pigment composition and applied aspects for biotechnology // FEMS Microbiology Ecology. 2009. V. 67. No. 3. P. 432–443. doi: 10.1111/j.1574-6941.2008.00641.x

14. Remias D., Schwaiger S., Aigner S., Leya T., Stuppner H., Lütz C. Characterization of an UV- and VIS-absorbing, purpurogallin-derived secondary pigment new to algae and highly abundant in *Mesotaenium berggrenii* (Zygnematophyceae, Chlorophyta), an extremophyte living on glaciers // FEMS Microbiology Ecology. 2012. V. 79. No. 3. P. 638–648. doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01245.x

15. PUFACHain Consortium. The value chain from microalgae to PUFA, project acronym: PUFACHain, grant no. 613303. FP7 Programme. European Commission, Brussels. 2017 [Internet resource] <https://cordis.europa.eu/project/rcn/110872> (Accessed: 16.02.2022).

16. Takeuchi N., Uetake J., Fujita K., Aizen V.B., Nikitin S.D. Asnow algal community on Akkem glacier in the Russian Altai mountains // Annals of Glaciology. 2006. V. 43. No. 1. P. 378–384. doi: 10.3189/172756406781812413

17. Procházková L., Remias D., Holzinger A., Řezanka T., Nedbalová L. Ecophysiological and ultrastructural characterization of the circumpolar orange snow alga *Sanguina aurantia* compared to the cosmopolitan red snow alga *Sanguina nivaloides* (Chlorophyta) // Polar Biology. 2021. No. 44. P. 105–117. doi: 10.1007/s00300-020-02778-0

18. Kol E. Kryobiologie / Eds. H.J. Elster, W. Ohle. Die Binnengewässer. V. 24. Stuttgart: Schweizerbart. Verlagsbuchh., 1968. 216 p. (in German).

19. Newton A.P.W. Red-coloured snow algae in Svalbard – some environmental factors determining the distribution of *Chlamydomonas nivalis* (Chlorophyta, Volvocales) // Polar Biology. 1982. No. 1. P. 167–172. doi: 10.1007/BF00287003

20. Gradinger R., Nurnberg D. Snow algal communities on Arctic pack ice floes dominated by *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille Proc // NIPR. Polar Biology. 1996. No. 9. P. 35–43.

21. Takeuchi N. The altitudinal distribution of snow algae on an Alaska glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range) // Hydrological Processes. 2001. No. 15. P. 3447–3459. doi: 10.1002/hyp.1040

22. Remias D., Albert A., Lütz C. Effects of realistically simulated, elevated UV irradiation on photosynthesis and pigment composition of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis* and the arctic soil alga *Tetracystis* sp. (Chlorophyceae) // Photosynthetica. 2010. V. 48. No. 2. P. 269–277. doi: 10.1007/s11099-010-0033-4

23. Hisakawa N., Quistad S.D., Hester E.R., Martynova D., Maughan H., Sala E., Gavrilov M.V., Rohwer F. Metagenomic and satellite analyses of red snow in the Russian Arctic // PeerJ. 2015. V. 3. No. 12. Article No. e1491. doi: 10.7717/peerj.1491

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

25. Vegetation cover of Khakassia / Ed. A.V. Kuminova. Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1976. 423 p. (in Russian).

26. Andersen R.A. Algal culturing techniques. New York: Elsevier, 2005. 589 p.

27. Andreeva V.M. Soil and aerophilic green algae (Chlorophyta: Tetrasporales, Chlorococcales, Chlorosarcinales). Sankt-Peterburg: Nauka, 1998. 352 p. (in Russian)

28. Ettl H., Gartner G. Syllabus der Boden-, Luft- und Flechtenalgen, Auflage 2. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2014. 773 p. (in German). doi: 10.1007/978-3-642-39462-1

29. Komárek J., Anagnostidis K. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota II: Oscillatoriales, Bd. 19/2. München: Springer Spektrum, 2005. 643 p.

30. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2022 [Internet resource] <http://www.algaebase> (Accessed: 16.03.2022).

31. Novakovkiy A.B. Interaction between Excel and Statistical package R for ecological data analysis // Vestnik IB Komi NC UrO RAN. 2016. No. 3. P. 26–33 (in Russian).

32. Davydov D.A., Patova E.N., Shalygin S.S., Vilnet A.A., Novakovskaya I.V. The problem of Cyanobacteria cryptic speciation in the Arctic region // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 110–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-110-116

Влияние ландшафтных условий на функционирование микробных сообществ постагрогенных почв тундровой зоны

© 2022. В. А. Ковалева, м. н. с., С. В. Денева, к. б. н., н. с.,
Ю. А. Виноградова, к. б. н., н. с., А. Н. Панюков, к. б. н., н. с.,
Е. М. Лаптева, к. б. н., доцент, зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: kovaleva@ib.komisc.ru

Исследованы микробные сообщества постагрогенных почв тундровой зоны Республики Коми. Установлено влияние ландшафтных условий на количественные и качественные показатели микробиоценозов 13–16-летних залежей, занимающих разное положение в ландшафте. Выявлено, что в ряду водораздел → надпойменная терраса → пойма в постагрогенных почвах наблюдается незначительное изменение численности бактерий при существенном увеличении числа грибных пропагул. В исследованном ряду постагрогенных почв наблюдается возрастание запасов микробной биомассы от 2,20 до 8,44 т/га, в структуре которой во всех почвах доминирует биомасса микромицетов (мицелия и спор грибов). В постагрогенных экосистемах надпойменной и пойменной террас основные запасы микроорганизмов сосредоточены в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв (48 и 57% соответственно), на водоразделе – в минеральных (70,5%). Основная часть функционально активных микроорганизмов представлена в органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтах постагрогенных почв. В них на долю живых бактерий приходится 62–84% от общего числа клеток. Наиболее благоприятные условия для развития грибного мицелия складываются в почвах постагрогенных экосистем, функционирующих в условиях пойменной террасы. Здесь в почве залежного участка доля (до 100%) функционально активного мицелия выше по сравнению с аналогичными участками, расположенными на вершине водораздела (до 85%) и надпойменной террасе (до 70%).

Ключевые слова: тундра, постагрогенные экосистемы, постагрогенные почвы, бактерии, грибы, микробная биомасса.

The influence of landscape conditions on the functioning of microbial communities of postagrogenic soils of the tundra zone

© 2022. V. A. Kovaleva ORCID: 0000-0001-5465-6134, S. V. Deneva ORCID: 0000-0002-1812-7799,
Yu. A. Vinogradova ORCID: 0000-0003-4891-4904, A. N. Panjukov ORCID: 0000-0002-4693-5835,
E. M. Lapteva ORCID: 0000-0002-9396-7979

Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000,
e-mail: kovaleva@ib.komisc.ru

Microbial communities of postagrogenic soils of the tundra zone of the Komi Republic were studied. It has been established that the main part of functionally active microorganisms is concentrated in organogenic and humus-accumulative horizons of postagrogenic soils. In the upper horizons of postagrogenic soils, the number of living bacterial cells is 62–84%. The influence of landscape conditions on the quantitative and qualitative indicators of microbiocenoses of 13–16-year-old fallows occupying different positions in the landscape, is shown. It was revealed that in the series of postagrogenic soils, the watershed → the terrace above the floodplain → the floodplain, the number of bacteria changes slightly, and the number of fungi increases. Micromycetes dominate in the microbial biomass of the analyzed soils. The proportion of mycelium in the total microbial biomass in organic and humus-accumulative horizons varies from 36 to 71%. In mineral horizons, where fungal mycelium is not found, the main components of microbial biomass are fungal spores – up to 99% of the total microbial biomass. The proportion of living functionally active mycelium in the soil of the floodplain fallow (up to 100%) is higher than in the fallows located at the top of the watershed (up to 85%) and the terrace above the floodplain (up to 70%). In the series of postagrogenic soils, the watershed → the floodplain terrace →

the floodplain, an increase in the reserves of microbial biomass from 2.20 to 8.44 t/ha was established. In the soils of the above-floodplain terrace and floodplain, the main share in the distribution of microorganism stocks belongs to the humus-accumulative soil horizons: 48 and 57%, respectively. In the postagrogenic soil at the top of the watershed, the main reserves of microbial biomass are concentrated in mineral horizons (70%).

Keywords: tundra, post-agrogenic ecosystems, post-agrogenic soils, bacteria, fungi, microbial biomass.

Традиционное землепользование в арктических и субарктических регионах России связано с развитием оленеводства. Однако, начиная с середины XX в. в России большое внимание было уделено сельскохозяйственному освоению тундровой зоны, в первую очередь, вблизи промышленных центров и городских агломераций. Так, в Воркутинском районе Республики Коми с целью обеспечения населения свежей сельскохозяйственной продукцией в 40–50-х гг. прошлого столетия была проведена распашка тундры как на водоразделах, так и в долине р. Воркута (на надпойменной и пойменной террасах) для создания кормовой базы местного животноводства [1]. В конце 90-х гг. эти угодья забросили, они перешли в залежные участки, на которых начался процесс постагрогенной трансформации бывших многолетних и однолетних лугов [2–4]. Такие экосистемы, приуроченные к арктической зоне России, представляют собой уникальные объекты, позволяющие раскрыть специфику функционирования и трансформации различных компонентов экосистем в процессе постагрогенной сукцессии в жёстких условиях Крайнего Севера. Учитывая слабую изученность почвенных микробных сообществ агро- и постагрогенных экосистем тундровой зоны [5], при исследовании закономерностей восстановления растительного покрова на бывших пахотных угодьях Воркутинской тундры особое внимание

было обращено на оценку состава и состояния почвенной микробиоты.

Цель исследования – выявить закономерности изменения численности, биомассы и функциональной активности микробных сообществ в постагрогенных почвах тундровой зоны Европейского Северо-Востока России.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в юго-восточной части Большеземельской тундры (Республика Коми, Воркутинский район). Объектами исследования послужили постагрогенные тундровые экосистемы, занимающие разные элементы ландшафта – водораздел, надпойменную и пойменную террасы долины р. Воркута (рис. 1).

Первый участок (В; 14-летняя залежь) расположен на плоской вершине водораздельного холма Нерусовой-Мусюр (67°53' с. ш., 64°11' в. д.). В 1965 г. на месте ерниково-ивняковой кустарничково-моховой тундры методом «залужения» был создан многолетний мятликовый луг, который использовали в течение длительного времени в качестве сенокосного угодья с внесением минеральных и органических удобрений для поддержания урожайности травостоя [1]. В 2000 г. участок

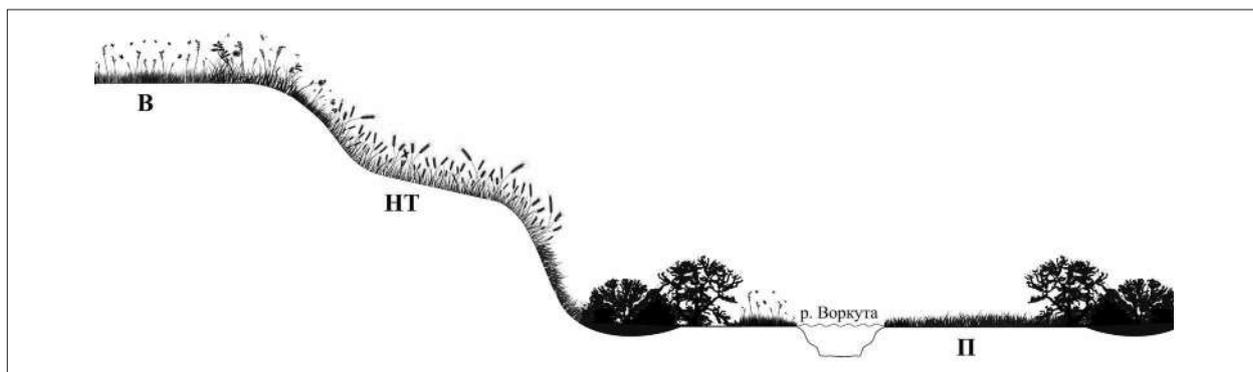


Рис. 1. Положение постагрогенных экосистем в ландшафте: В (вершина водораздельного холма) – разнотравно-мятликовый луг (14-летняя залежь), НТ (надпойменная терраса) – лисохвостно-мятликовый луг (16-летняя залежь), П (пойма) – пойменный разнотравно-костровый луг (13-летняя залежь)
Fig. 1. The position of post-agrogenic ecosystems in the landscape: В (top of the watershed hill) – forb-grass meadow (14-year-old fallow), НТ (above-floodplain terrace) – foxtail-bluegrass meadow (16-year-old fallow), П (floodplain) – floodplain forb-bonfire meadow (13-year-old fallow)

вывели из режима сельскохозяйственного использования.

Второй участок (НТ; 16-летняя залежь) расположен на надпойменной террасе в долине р. Воркута (67°53' с. ш., 64°05' в. д.). Это первый сеяный луг в Заполярье, который создали в 1958 г. путём посева *Poa pratensis* и *Alopecurus pratensis* после распашки тундры [1]. Как и на участке В, здесь ежегодно производили сенокосшение, вносили минеральные и органические удобрения [6]. Хозяйственное использование луга прекратили в 1998 г. [2].

Третий участок (П; 13-летняя залежь) приурочен к пойменной террасе р. Воркута (67°53' с. ш., 64°03' в. д.). Включение этого участка в сельскохозяйственное производство способствовало зарегулированию стока реки и выход пойменной террасы из режима ежегодного затопления в связи со строительством в 50-х гг. XX века ТЭЦ, возведением плотины и водохранилища выше по течению. На участке П возделывали однолетние культуры – овёс (*Avena sativa*) и овсяно-гороховую смесь (*A. sativa* + *Pisum sativum*) [1]. Участок переведен в залежь в 2001 г. [2, 6].

Пробы почв для физико-химических исследований отбирали из опорных разрезов по генетическим горизонтам, для микробиологических исследований – с учётом стерильности. Анализировали почвы в лаборатории отдела почвоведения и экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в соответствии с общепринятыми методами. Численность бактерий, спор грибов и длину их мицелия в образцах почв определяли методом прямого микроскопирования с использованием флуорохромных красителей и последующим расчётом микробной биомассы (МБ) [7, 8]. Препараты для оценки жизнеспособности мицелия (гиф) грибов окрашивали флуоресцеин диацетатом (ФДА) согласно методике [9], бактерий – с использованием красителя L7012 (LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kits) [10].

Результаты и обсуждение

Общая характеристика растительности и почв постагрогенных участков. В настоящее время на участке В (водораздел; 14-летняя залежь) отмечено снижение доли мятлика в травостое до 62%, зафиксированы многочисленные синузии *Deschampsia cespitosa*, небольшие пятна *Alopecurus pratensis* и *Calamagrostis neglecta*. Из разнотравья наиболее обильны *Chamaenerion angustifolium*, *Veronica*

longifolia, *Equisetum pratense*, *Amoria repens*, *Taraxacum ceratophorum*, *Achillea millefolium* и др. В последние годы луг активно зарастает ивняком. В некоторых местах сомкнутость *Salix phylicifolia* достигает 30–40%. Большими пятнами появляется моховой покров, сложенный пионерными видами зелёных мхов, редко встречаются лишайники.

В растительном сообществе участка НТ (надпойменная терраса; 16-летняя залежь) доминируют *Poa pratensis* и *Alopecurus pratensis*. Процессы демулационной сукцессии проявляются в увеличении неоднородности травянистого сообщества – внедряющиеся в травостой *Deschampsia cespitosa*, *Chamaenerion angustifolium*, *Achillea millefolium*, *Equisetum arvense* образуют злаковые и разнотравно-злаковые синузии. Отмечено внедрение в травостой единичных особей *Salix phylicifolia*.

Растительное сообщество участка П (пойменная терраса; 13-летняя залежь) характеризуется наиболее однородным составом. Здесь на месте пашни за 14-летний период после прекращения сельскохозяйственного использования сформировался разнотравно-злаковый луг с доминированием *Bromopsis inermis*, из разнотравья наиболее значимы *Veronica longifolia*, *Pachipleurum alpinum*, *Angelica archangelica*.

Почвы постагрогенных экосистем рассматриваемого ряда: водораздел → надпойменная терраса → пойменная терраса имеют разное классификационное положение. Почва участка В отнесена нами к глеезёмам криометаморфическим постагрогенным, участка НТ – глеезёмам криотурбированным постагрогенным, участка П – аллювиальным гумусовым глееватым постагрогенным. На водоразделе и надпойменной террасе почвы сформированы на суглинистых почвообразующих породах, в пойме – на аллювиальных отложениях супесчано-песчаного гранулометрического состава. На всех участках почвы сохранили признаки и свойства, сформировавшиеся в период их активного сельскохозяйственного использования. Во всех профилях чётко выражен гумусово-аккумулятивный горизонт АУ – бывший пахотный горизонт, который в настоящее время дифференцирован по уровню аккумуляции органического вещества на подгоризонты О_в (ветошь), АУ_{гз,ао} (дерновый горизонт с обилием слабо разложившихся растительных остатков), АУ_{ра,г} (бывший пахотный горизонт с признаками оглеения) (табл. 1). Максимальной мощностью горизонта АУ отличается почва участка П – до 40–45 см (для

Таблица 1 / Table 1

Агрохимические показатели постагрогенных тундровых почв
 Agrochemical indicators of postagrogenic tundra soils

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	pH _{KCl}	C _{общ.} C _{total}	N _{общ.} N _{total}	C/N	Подвижные формы Mobile forms		Обменные катионы Exchange cations	
			%	%		P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
						мг/кг / mg/kg	мг/кг / mg/kg	смоль/кг / cmol/kg	смоль/кг / cmol/kg
Участок В, вершина водораздела, 14-летняя залежь Site B, the top of the watershed, 14-year-old fallow									
Ov	0–3	5,6	37,4	1,3	28,8	304	2724	33,1	5,5
AУrz,ao	3–6	5,4	31,1	1,9	16,4	402	1878	33,6	4,4
AУao	6–7	5,3	13,4	1,0	13,3	343	631	10,7	1,2
AУpa,g	7–17	4,7	3,5	0,3	12,1	154	395	6,2	0,6
Bg	17–36(39)	4,8	0,6	0,05	11,1	34	134	2,2	0,5
CRM1	36(39)–55(57)	5,0	0,3	0,04	7,5	58	157	4,6	1,4
CRM2g	55(57)–110	5,5	0,3	0,04	7,5	116	134	11,5	3,2
CRM3g	110–135	5,9	0,3	0,04	6,8	154	136	13,5	3,5
Участок НТ, надпойменная терраса, 16-летняя залежь Site AFT, above-floodplain terrace 16-year-old fallow									
Ov	0–1	5,8	28,9	1,5	18,8	1956	2093	40,8	4,7
AУrz,ao	1–5,5	6,1	23,7	1,5	15,6	2906	1233	44,7	4,6
AУpa, g	5,5–13(26)	5,6	3,0	0,2	13,6	645	335	28,4	3,4
G1@	13(26)–39	6,1	0,2	0,04	4,8	190	151	16,2	2,5
G2	39–77	6,6	0,2	0,04	5,3	241	230	15,6	4,1
G3	77–88	6,9	0,2	0,04	5,3	151	188	17,9	4,0
CG	88–132	6,9	0,2	0,04	5,3	240	194	14,7	3,0
Участок П, пойменная терраса, 13-летняя залежь Site F, floodplain of the river, 13-year-old fallow									
Ov	0–2	6,1	27,4	0,9	24,1	1784	1573	35,1	4,2
AУrz	2–6	6,7	14,0	0,3	4,2	1361	569	22,4	2,5
AУpa	6–20	7,3	17,4	0,2	2,6	427	145	17,1	1,0
AУpa,g	20–30	6,9	13,7	0,2	2,6	403	73	16,5	1,0
AУg/Cg~~	30–45	6,8	9,6	0,08	0,8	176	53	9,7	0,9
C1~~	45–111	6,9	9,6	0,04	0,4	206	62	7,6	0,9
C2~~	111–128	6,8	8,6	0,04	0,3	247	73	4,9	1,6
C3g~~	128–170	6,8	9,2	0,04	0,3	265	81	3,1	1,4

сравнения на участках В и НТ мощность горизонта АУ составляет не более 26 см). Это связано как с условиями формирования почвы на участке П (аллювиальная пойменная почва), так и с его длительным сельскохозяйственным использованием (спецификой технологических приёмов возделывания однолетних трав).

Окультуривание тундровых почв, внесение в течение длительного времени минеральных удобрений и известковых материалов обусловили слабокислую и близкую к нейтральной реакцию среды, высокое содержание биогенных элементов в верхних горизонтах почв агроэкосистем [6], сохраняющиеся и на постагрогенном этапе их функционирования (табл. 1). Некоторые различия в уровне

аккумуляции органического вещества (C_{общ.}, N_{общ.}), подвижных форм биофильных элементов (P₂O₅ и K₂O), обменных катионов (Ca²⁺ и Mg²⁺) в верхних горизонтах (Ov, AУrz,ao, AУpa,g) могут быть обусловлены спецификой состава растительного покрова [11], различиями в скорости разложения ветоши (старички) и особенностями аккумуляции органического вещества в различных микроклиматических условиях рассматриваемых позиций ландшафта (водораздел, надпойменная терраса, пойма реки). Минеральная часть профилей, залегающая глубже органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтов, соответствует по своим свойствам целинным тундровым почвам [6].

Таблица 2 / Table 2

Численность и биомасса прокариот, спор грибов и длина грибного мицелия в постагрогенных тундровых почвах
 The number of prokaryotes, fungal spores and the length of the fungal mycelium in postagrogenic tundra soils

Горизон Horizon	Глубина, см Depth, cm	Численность бактерий, $\times 10^9$ кл./г The number of bacteria, $\times 10^9$ cells/g		Численность спор грибов, $\times 10^6$ кл./г The number of spores, $\times 10^6$ cells/g	Длина мицелия грибов, м/г Mycelium length of fungi, m/g	Биомасса, мкг/г / Biomass, $\mu\text{g/g}$				
		общая total	живые клетки live cells			мёртвые клетки dead cells	бактерии bacteria	споры грибов spores of fungi	мицелий грибов mycelium of fungi	общая total
Участок В, вершина водораздела, 14-летняя залежь / Site В, the top of the watershed, 14-year-old fallow										
Ov	0-3	2,20	1,8±0,4	0,40±0,11	32±12	352±23	44	697	1483	2224
AУгz,ao	3-6	4,33	1,4±0,5	0,22±0,06	29±5	163±14	26	580	985	1591
AУao	6-7	0,76	0,63±0,08	0,13±0,03	18±2	71±4	14	360	247	621
AУpa,g	7-17	0,18	0,13±0,04	0,053±0,012	16±1	48±2	3	200	112	315
Bg	17-36(39)	0,16	0,12±0,03	0,034±0,011	8,2±1,2	0	1	164	0	165
CRM1	36(39)-55(57)	0,065	0,032±0,011	0,033±0,010	6,4±0,8	0	1	128	0	129
CRM2g	55(57)-110	0,075	0,043±0,011	0,032±0,011	5,2±0,6	0	2	104	0	106
CRM3g	110-135	0,071	0,042±0,009	0,029±0,008	5,3±0,7	0	2	106	0	108
Участок НТ, надпойменная терраса, 16-летняя залежь / Site АFT, above-floodplain terrace 16-year-old fallow										
Ov	0-4	2,32	1,9±0,6	0,43±0,11	29±8	490±37	46	619	1896	2561
AУгz,ao	1-5,5	1,69	1,4±0,4	0,32±0,09	26±7	351±21	34	553	1292	1878
AУpa, g	5,5-13(26)	0,64	0,51±0,11	0,1±0,04	22±6	119±13	14	482	925	1421
G1@	13(26)-39	0,16	0,13±0,05	0,032±0,011	10±4	0	2	222	0	224
G2	39-77	0,083	0,052±0,011	0,031±0,009	4,1±1,2	0	2	84	0	86
G3	77-88	0,453	0,23±0,13	0,23±0,10	4,2±1,5	0	8	88	0	96
CG	88-132	0,590	0,34±0,12	0,21±0,10	8,6±3,1	0	11	172	0	183
Участок П, пойменная терраса, 13-летняя залежь / Site F, floodplain of the river, 13-year-old fallow										
Ov	0-2	2,05	1,7±1,2	0,34±0,10	60±13	501±46	40,8	1301,0	1258	2600
AУгz	2-6	1,32	1,1±0,3	0,21±0,08	54±12	456±12	46,3	1080,0	1124	2250
AУpa	6-20	0,75	0,63±0,11	0,12±0,05	37±11	165±15	26,3	720,0	985	1731
AУpa,g	20-30	0,34	0,21±0,05	0,13±0,05	21±9	87±4	14,8	424,0	452	891
AУg, Cg~~	30-45	0,10	0,07±0,05	0,028±0,011	23±7	0	6,2	462,0	0	468
C1~~	45-111	0,080	0,048±0,012	0,032±0,009	18±6	0	2,1	370,0	0	372
C2~~	111-128	0,097	0,051±0,010	0,046±0,011	8,3±1,7	0	1,7	172,0	0	174
C3g~~	128-170	0,096	0,049±0,011	0,047±0,012	8,3±1,4	0	1,6	172,0	0	174

Численность и профильное распределение микроорганизмов в постагрогенных почвах. Распределение микроорганизмов в почвах постагрогенных экосистем, занимающих различные ландшафтные позиции, имеет однотипный характер – максимум численности бактерий, спор грибов и длины грибного мицелия приходится на верхние органогенные горизонты (Ov, AYrz,ao), где сосредоточена основная часть слаборазложившихся растительных остатков и корней травянистых растений (табл. 2). Ниже по профилю наблюдается закономерное снижение параметров численности основных групп микроорганизмов.

В отличие от распределения бактерий и спор грибов, которые встречены на всех глубинах рассмотренных профилей почв, мицелий грибов приурочен только к верхним горизонтам. На участке В глубина их проникновения в почву ограничена 17 см, участка НТ – 13 (26) см, участка П – 30 см, что обусловлено неблагоприятными физико-химическими свойствами почв, особенно на участке В, поскольку для минеральной части профиля тундровых почв характерны: переувлажнение, недостаток кислорода, развитие процессов оглеения, низкие температуры [6]. В постагрогенных экосистемах надпойменной (НТ) и пойменной (П) террас длина грибного мицелия в почвах в 1,4–2,8 раза выше по сравнению с почвой водораздельного участка.

Во всех рассмотренных почвах соотношение бактерий с ненарушенной (живые) и нарушенной (мёртвые) клеточной стенкой, которое определяет жизнеспособный пул прокариот в почвах и их функциональную активность, имеет близкий характер. В верхних горизонтах почв залежей сконцентрирована не только основная масса прокариот, но и её функционально активная часть – на долю живых клеток в горизонтах Ov и AYrz,ao приходится 81–84% от общего числа бактерий. В нижележащих горизонтах увеличивается доля мёртвых, функционально неактивных клеток, постепенно снижаясь в бывших пахотных горизонтах (AYra,g) до 62–72%, а в минеральной части профиля – до 49–60%.

Некоторое увеличение численности бактерий в почве участка НТ на глубине 77–135 см (табл. 2) может быть обусловлено наличием мерзлоты на глубине ниже 135 см (для сравнения, на двух других участках мерзлота в пределах 2-метровой толщи профиля отсутствовала). Возрастание численности микроорганизмов в надмерзлотных горизонтах характерно

для криогенных почв [12, 13]. Это может быть обусловлено аккумуляцией микроорганизмов, вымываемых из верхних горизонтов гравитационной влагой и перемешиванием слоёв в результате криотурбационных процессов [14, 15]. Примерно половина всех бактериальных клеток (42–50%) в надмерзлотных слоях представлена функционально не активными (мёртвыми или повреждёнными) клетками.

Состав, структура и запасы микробной биомассы в постагрогенных почвах. В структуре МБ всех анализируемых почв доминируют грибы (табл. 2). В верхней части профиля (органогенные и гумусово-аккумулятивные горизонты) ведущую роль в грибной биомассе играет мицелий (40,7–75,4%), в нижней минеральной – споры грибов (100%). На долю бактерий приходится всего 0,6–2,3% от суммарной МБ. Исключением являются надмерзлотные слои (глубина 77–135 см) почвы участка НТ, где за счёт надмерзлотной аккумуляции клеток бактерий наблюдается повышение доли их биомассы в структуре общей МБ до 6,0–8,4%.

Органопродуценты рассмотренных почв достаточно чётко различаются как по профильному распределению биомассы грибного мицелия, так и по соотношению в ней функционально активных (живых) и неактивных (мёртвых, с нарушенной клеточной стенкой) гиф (рис. 2). Наиболее ярко выраженной концентрацией грибного мицелия (985–1483 мкг/г почвы) вблизи поверхности почвы (глубина 0–6 см) отличается постагрогенный участок В, расположенный на водоразделе. В этой почве глубже 6 см биомасса мицелия снижается в 6–13 раз с возрастанием в ней до 57% функционально неактивных гиф (для сравнения, в поверхностных горизонтах на долю живого мицелия приходится 70–85%). В направлении от водораздела к пойме реки наблюдается увеличение мощности слоя, в котором сконцентрирована биомасса мицелия (до 20 см от поверхности почвы). Однако, если на участке НТ соотношение живых и мёртвых гиф на всех глубинах бывшего пахотного горизонта имеет относительно близкие показатели (56–70% живых, 30–44% мёртвых гиф), то в пойме р. Воркута на всех глубинах бывшего пахотного горизонта постагрогенной почвы доминирует биомасса живого мицелия – с уменьшением от 100% в его верхней части до 77% – в нижней части. Последнее свидетельствует о более благоприятных условиях для развития мицелия почвенных грибов в постагрогенных экосистемах, формирующихся

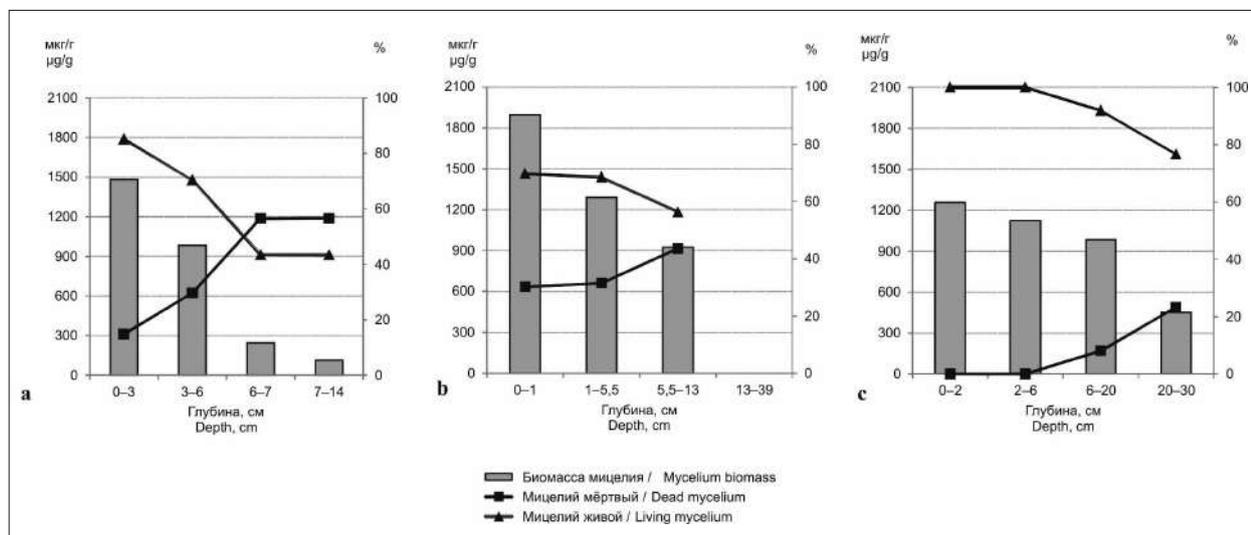


Рис. 2. Доля (в %) живого мицелия в общей биомассе мицелия грибов в почвах постагрогенных экосистем, занимающих разные позиции в ландшафте: а – участок В, водораздел; б – участок НТ (надпойменная терраса); с – участок II, пойменная терраса р. Воркута
Fig. 2. The proportion (in %) of living mycelium in the total biomass of the mycelium of fungi in soils of post-agrogenic ecosystems: а – site В, watershed; б – site НТ (above-floodplain terrace); с – site II, floodplain terrace of Vorkuta river

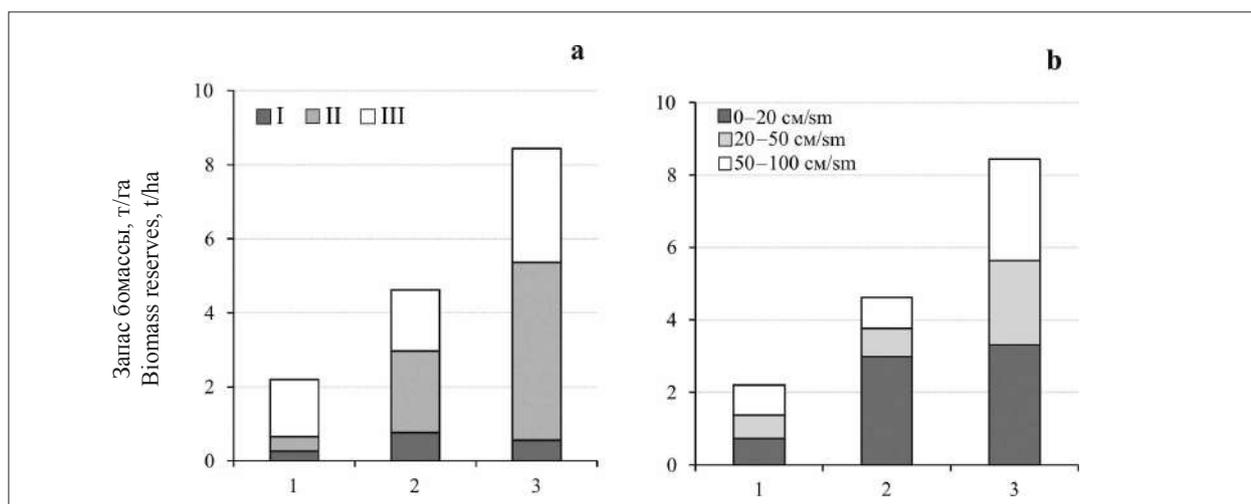


Рис. 3. Распределение запасов микробной биомассы по профилю постагрогенных почв: 1 – участок В, водораздел; 2 – участок НТ, надпойменная терраса; 3 – участок II, пойменная терраса р. Воркута; I – органогенный горизонт (Ov + AYrz,ao); II – гумусово-аккумулятивный горизонт (AYao + AYpa,g); III – минеральный горизонт до глубины 100 см
Fig. 3. Distribution of microbial biomass reserves according to the profile of post-agrogenic soils: 1 – site В, watershed; 2 – site НТ, above-floodplain terrace; 3 – site II, floodplain terrace of Vorkuta river; I – organogenic horizon (Ov + AYrz,ao); II – humus-accumulative horizon (AYao + AYpa,g); III – mineral horizon up to a depth of 100 cm

в долине р. Воркута, особенно на территории пойменной террасы (II).

Расчёт запасов МБ с учётом мощности горизонтов (рис. 3а) и слоёв почвы (рис. 3б) в пределах метровой толщи профиля выявил чёткий тренд увеличения этого параметра в направлении от водораздела к пойме реки, соответственно 2,20 (В), 4,63 (НТ) и 8,44 т/га (II). На водоразделе (В) основную роль в аккумуляции МБ играют минеральные горизон-

ты, в них сосредоточено 70,5% от суммарных запасов МБ. В почвах постагрогенных экосистем, расположенных в долине р. Воркута, возрастает роль органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтов – соответственно 47,6 (НТ) и 56,9% (II).

Общей закономерностью для всех рассмотренных почв является преимущественное накопление запасов МБ в первом полуметре профиля – соответственно 62,5 (В), 81,4

(НТ) и 66,8% (П) от суммарных запасов МБ. Несмотря на возрастание запасов МБ в постагрогенных почвах долинных ландшафтов по сравнению с водоразделом, присутствие мерзлоты во втором метре почвы участка НТ и соответственно меньшая численность в её минеральной части спор грибов (табл. 2) обусловили более ярко выраженное концентрирование запасов МБ как в первом полуметре профиля (81,4%), так и в верхнем 0–20 см слое почвы (64,5%). Для сравнения в слое 0–20 см почв участков В и П сосредоточено 32,7 и 39,5% от суммарной величины МБ в метровом слое почвы. «Прижатость» микроорганизмов к поверхностным слоям почвы и «укороченность» микробного профиля является характерной чертой тундровых экосистем [12].

Заключение

Таким образом, впервые для тундровой зоны европейского северо-востока России (Большеземельская тундра, Республика Коми) установлены закономерности распределения численности микроорганизмов в постагрогенных почвах, оценены структура и запасы в них микробной биомассы. Впервые определено функциональное состояние микробных сообществ в постагрогенных почвах южной тундры. Показано, что основной пул функционально активных бактерий сосредоточен в бывших пахотных горизонтах (глубина 0–20 см), где на их долю приходится до 62–84%. В минеральных горизонтах при снижении общей численности бактерий возрастает доля (до 49–60%) клеток с нарушенной клеточной мембраной. В структуре микробной биомассы доминирующее положение занимают микроскопические грибы – в бывших пахотных горизонтах основной вклад в биомассу грибов вносит мицелий (40,7–75,4%), в минеральных – споры грибов (100%). Наличие мерзлоты в профиле постагрогенной почвы определяет более выраженную «прижатость» микробных сообществ к поверхностным горизонтам почвенного профиля и некоторое увеличение численности бактерий в надмерзлотных горизонтах.

Оценено влияние ландшафтных условий на формирование микробных сообществ в постагрогенных почвах тундры. Наиболее благоприятные условия для функционирования комплекса микроорганизмов, в первую очередь, микромицетов, складываются в долинных ландшафтах тундры. В ряду постагрогенных почв «водораздел – надпойменная терра-

са – пойма» возрастают показатели численности спор, длины мицелия грибов, глубина его проникновения в почву, и соответственно увеличиваются запасы микробной биомассы от 2,20 т/га на водоразделе до 8,44 т/га в постагрогенной почве пойменной террасы. При этом основная доля биомассы грибного мицелия в пойменной постагрогенной почве представлена живыми гифами (77–100%), тогда как в почвах залежей на водоразделе и надпойменной террасе эта доля составляет 43–85% и 56–70% соответственно. В постагрогенной почве на водоразделе основные запасы микробной биомассы сосредоточены в минеральных горизонтах (70,5%), в почвах надпойменной террасы и поймы – в гумусово-аккумулятивных горизонтах (47,6 и 56,9% соответственно).

Работа выполнена в рамках темы НИР «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов» (регистрационный номер: 122040600023-8).

References

1. Hantimer I.S. Agricultural development of the tundra. Leningrad: Nauka, 1974. 227 p. (in Russian).
2. Panyukov A.N., Kotelina N.S., Archegova I.B., Khabibullina F.M. Biological diversity and productivity of anthropogenic ecosystems of the Far North. Ekaterinburg, 2005. 120 p. (in Russian).
3. Panyukov A.N., Archegova I.B. Transformation of postagrogenic ecosystems in the Far North // Zemledelie. 2011. No. 5. P. 3–5 (in Russian).
4. Novakovskiy A.B., Panyukov A.N. Analysis of the succession dynamics of a seeded meadow using the Ramensky – Grime system of life strategies // Ekologiya. 2018. No. 2. P. 110–118 (in Russian). doi: 10.7868/S036705971802004X
5. Kovaleva V.A., Deneva S.V., Lapteva E.M. Microbiological characteristics of postagrogenic and virgin tundra soils (Vorkuta district of the Komi Republic) // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 2020. No. 5. P. 5–16 (in Russian). doi: 10.17076/eco1162
6. Ecological foundations of productivity management of agrophytocenoses of the Eastern European tundra / Ed. I.B. Archegova. Leningrad: Nauka, 1991. 152 p. (in Russian).
7. Methods of soil microbiology and biochemistry / Ed. D.G. Zvyagintsev. Moskva: MGU, 1991. 304 p. (in Russian).
8. Polyanskaya L.M., Zvyagintsev D.G. The content and structure of microbial biomass as indicators of the

ecological state of soils // *Pochvovedenie*. 2005. No. 6. P. 706–714 (in Russian).

9. Tsuji T., Kawasaki Y., Seriya T., Tanaka S. A new fluorescence staining assay for visualizing living microorganisms in soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 1995. V. 61. P. 3415–3421. doi: 10.1128/aem.61.9.3415-3421.1995

10. Lysak L.V., Lapygina E.V., Konova I.A., Zvyagintsev D.G. Abundance and taxonomic composition of ultramicrobacteria in soils // *Mikrobiologiya*. 2010. V. 79. No. 3. P. 428–432 (in Russian).

11. Biogeocenological studies on seeded meadows in the East European tundra / Eds. I.B. Archegova, N.S. Kotelina. Leningrad: Nauka, 1979. 192 p. (in Russian).

12. Spirina E.V., Fedorov-Davydov D.G. Microbiological characteristics of permafrost soils of the Kolyma lowland // *Pochvovedenie*. 1998. No. 12. P. 1462–1475 (in Russian).

13. Ivanova T.I., Kuzmina N.P., Savvinov D.D. Microbiocenoses of permafrost soils of the Tuimaada Valley of Central Yakutia // *Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya*. 2014. No. 6. P. 573–585 (in Russian). doi: 10.7868/S0002332914060034

14. Lysak L.V., Dobrovolskaya T.G. Bacteria in tundra soils of Western Taimyr // *Pochvovedenie*. 1982. No. 39. P. 74–77 (in Russian).

15. Parinkina O.M. Microflora of tundra soils: Ecological and geographical features and productivity. Leningrad: Nauka, 1989. 159 p. (in Russian).

Эколого-демографическая характеристика ценопопуляций *Cypripedium calceolus* L. в Кировской области

© 2022. Н. Ю. Егорова^{1,2}, к. б. н., с. н. с., доцент,
В. Н. Сулейманова^{1,2}, к. б. н., с. н. с., доцент, Е. В. Рябова³, к. б. н., зав. кафедрой,

¹Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова, 610000, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,

²Вятский государственный агротехнологический университет, 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133,

³Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: n_chirkova@mail.ru, venera_su@mail.ru, ryapitschi@yandex.ru

Представлены результаты изучения демографических параметров 10 ценопопуляций (ЦП) *Cypripedium calceolus* L. в подзоне южной тайги Кировской области (Слободской, Афанасьевский, Лебяжский районы). Установлено, что в местообитаниях с *C. calceolus* основной фон растительных группировок формируют представители бореальной и неморальной эколого-ценологических групп. Лимитирующими экологическими факторами, оказывающими влияние на распространение вида, являются освещённость и кислотность почвы. Преобладающим типом онтогенетического спектра в изученных ЦП является генеративно-ориентированный. По классификации «дельта–омега» исследуемые ЦП представлены стареющим и переходным типами. По жизненному состоянию большинство ЦП являются процветающими, за исключением изученных на отвалах отработанного известкового карьера (ЦП 5, 7), которые отнесены к депрессивному типу. Комплексная оценка состояния *C. calceolus* показала, что популяции находятся в состоянии «близком к угрожаемому» или «зависящем от сохранения».

Ключевые слова: *Cypripedium calceolus* L., ценопопуляция, демографическая характеристика, онтогенетический спектр, эколого-ценологическая группа, Кировская область.

Ecological and demographic characteristics of *Cypripedium calceolus* L. coenopopulations in the Kirov region

© 2022. N. Y. Egorova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-5891-4580
V. N. Suleymanova^{1,2}, ORCID: 0000-0001-8401-1417, E. V. Ryabova³, ORCID: 0000-0002-0125-5772

¹Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Vyatka State Agrotechnological University, 133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: n_chirkova@mail.ru, venera_su@mail.ru, ryapitschi@yandex.ru

The results of studying the ecological and demographic parameters of 10 cenopopulations (CP) of *Cypripedium calceolus* L. in the subzone of the southern taiga in the Kirov region (Slobodskoy, Afanasievsky, Lebyazhsky districts) are presented. In habitats with *C. calceolus*, the main background of plant groupings is formed by representatives of boreal and non-morale ecological-cenotic groups. The limiting factors affecting the spread of the species are the illumination and acidity of the soil. The generative-oriented type of the ontogenetic spectrum is predominant. According to the “delta–omega” classification, the studied CPs are represented by aging and transitional types. According to the vital state, most CPs are thriving, with the exception of CP 5, 7. A comprehensive assessment of the state of *C. calceolus* showed that the populations are in a state “close to threatened” or “dependent on conservation”.

Keywords: *Cypripedium calceolus* L., cenopopulation, demographic characteristics, ontogenetic spectrum, ecological-cenotic group, Kirov region.

Семейство Orchidaceae – одно из интереснейших с точки зрения биологии и экологии семейств покрытосеменных растений [1]. Несмотря на то, что представители этого семейства являются объектом пристального внимания многих исследователей, вопросы, касающиеся локального влияния эколого-ценотических условий местообитания на популяции орхидей, требуют более детального изучения. Такие исследования важны для сохранения локального биологического разнообразия [2] и прогнозирования поведения вида в изменяющихся условиях среды.

Объект нашего исследования – *Cypripedium calceolus* L. (венерин башмачок настоящий). Вид имеет голарктический ареал, но повсеместно редок и малочислен, поэтому охраняется на территории Российской Федерации [3], включён в приложение II Конвенции СИТЕС [4]. В Кировской области имеет III категорию статуса редкости Международного союза охраны природы, известно более 50 местообитаний вида [5]. Однако комплексное изучение популяционных параметров *C. calceolus* и их мониторинг охватывает лишь отдельные популяции [6], что недостаточно для разработки региональных критериев охраны.

Цель настоящей работы – изучение эколого-демографических параметров ценопопуляций *C. calceolus* в различных эколого-ценотических условиях подзоны южной тайги в пределах Кировской области.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в 2020 г. в 10 ЦП *C. calceolus* (табл. 1), расположенных в подзоне южной тайги Кировской области (ЦП 1–7 – в Слободском, ЦП 8 и 9 – в Афанасьевском, ЦП 10 – в Лебяжском районах).

Описание исследованных растительных сообществ проводили в соответствии с общепринятыми геоботаническими методами и подходами [7]. Латинские названия сосудистых растений приведены по [8]. Анализ эколого-ценотической структуры растительных сообществ с *C. calceolus* осуществляли с использованием подхода, предложенного в работе [9].

Условия местообитаний *C. calceolus* оценивали индикаторными методами с использованием экологических шкал Д.Н. Цыганова [10]. Онтогенез *C. calceolus* описан в [11]. В онтогенетической структуре ЦП выделяли следующие онтогенетические состояния: ювенильные (j), имматурные (im), виргинильные

(v), генеративные (g). Для характеристики онтогенетической структуры ЦП применяли индексы генеративности ($I_{ген.}$) и возобновляемости ($I_{возобн.}$), рассчитанные по [12]. Тип ЦП определяли по классификации «дельта-омега» [13], с учётом поправок, предложенных в [14] на основе индексов возрастности (Δ) и эффективности (ω) [13, 15].

Для координации ЦП по градиенту комплексного фактора благоприятности условий применяли индекс виталитета ЦП (IVC) [16]. Виталитетную структуру ценотических популяций анализировали с помощью интегрального показателя качества популяций – Q [17]. Оценку состояния и природоохранной значимости ЦП редкого вида определяли по интегрированному показателю организменных и популяционных характеристик вида – SC [16]. Статистическую обработку данных проводили в MS Excel 2010, PAST 3.15 [18].

Результаты и обсуждение

Изученные местообитания *C. calceolus* приурочены к облесённым склонам коренных берегов рек Вятка и Кама, где исследуемый вид встречается как в условиях естественных хвойных насаждений, так и техногенной среды выведенного из эксплуатации карьера по добыче известняка, находящегося в стадии вторичной сукцессии и формирования лесных формаций (ЦП 5–7). В лесных насаждениях на момент исследования *C. calceolus* хозяйственная деятельность не осуществлялась; отмечены следы рубок ухода 10–20 летней давности. В сложении древесного яруса фитоценозов с исследуемым видом принимают участие *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sylvestris* L., *Abies sibirica* Ledeb. Возраст древостоя в сообществах варьирует от 25 до 80 лет, высота – от 18 до 23 м, сомкнутость крон – от 0,1 до 0,7. Подрост, как правило, разреженный, состоит из *Picea abies*, *Abies sibirica*. В подлеске отмечены *Sorbus aucuparia* L., *Atragene sibirica* L., *Rosa acicularis* Lindl., *Juniperus communis* L., *Lonicera xylosteum* L., *Ribes spicatum* E. Robson.

Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ) варьирует от 25 (ЦП 8) до 65% (ЦП 9). Общее число видов сосудистых растений в изученных сообществах с *C. calceolus* изменяется от 19 до 54. С наибольшим постоянством в составе исследуемых сообществ встречаются следующие виды: 90% – *Rubus saxatilis* L., по 80% – *Fragaria vesca* L., *Orthilia secunda* (L.) House, по 70% – *Solidago virgaurea* L., по 60% –

Таблица 1 / Table 1

Местонахождение и характеристика изученных ценопопуляций *Cyripedium calceolus*
 Location and characteristics of the studied coenopopulations of *Cyripedium calceolus*

ЦП СР	Местонахождение Location	Тип фитоценоза, формула древостоя, таксационные параметры древесного яруса Type of phytocenosis, taxation parameters of tree layer	Проективное покрытие травяно- кустарничкового яруса, % Projective coverage of grass-bush layer, %
1	Верхняя часть крутого склона южной экспозиции коренного берега р. Вятка / The upper part of the steep slope of the southern exposure of the root bank of the Vyatka River	Ельник разнотравный, 7ЕЗП; сомкнутость крон деревьев 0,5; возраст древостоя 75 лет / Spruce forest forb; density of tree crowns 0.5; stand age 75 years	60
2	Верхняя часть крутого склона юго-западной экспозиции коренного берега р. Вятка / The upper part of the steep slope of the south-western exposure of the root bank of the Vyatka River	Ельник травяной, 8Е2П; сомкнутость крон деревьев 0,4; возраст древостоя 70 лет / Spruce forest grassy; density of tree crowns 0.4; stand age 70 years	20
3	Средняя часть пологого холма восточной экспозиции коренного берега р. Вятка / The middle part of the gentle hill of the eastern exposure of the root bank of the Vyatka Rive	Сосняк травяной, 6С2П1Е1Ос; сомкнутость крон деревьев 0,4; возраст древостоя 70 лет / Grassy pine forest; density of tree crowns 0.4; stand age 70 years	60
4	Крутой склон юго-восточной экспозиции (около 30%) коренного берега р. Вятка / The steep slope of the southeastern exposure (about 30%) of the root bank of the Vyatka River	Ельник с примесью пихты и сосны травяной, 6Е2П2С; сомкнутость крон деревьев 0,5–0,6; возраст древостоя 80 лет / Spruce forest with an admixture of fir and pine grassy; density of tree crowns 0.5–0.6; stand age 80 years	35
5	Крутые склоны (1–7 м) на коренном берегу р. Вятка / Steep slopes (1 to 7 m) on the root bank of the Vyatka River	Сосняк с ивой разнотравный на отвалах отработанного известкового карьера , 5С5И; сомкнутость крон деревьев 0,1–0,3; возраст древостоя 25 лет / Pine forest with mixed willow on the dumps of an exhausted lime quarry; density of tree crowns 0.1–0.3; stand age 25 years	25
6	Крутые склоны (1–7 м) на коренном берегу р. Вятка Вятка / Steep slopes (1 to 7 m) on the root bank of the Vyatka River	Сосняк грушанково-зеленомошный, 8С2Е+Ос+ИВД; сомкнутость крон деревьев 0,2; возраст древостоя 35–40 лет / Wintergreen-green moss pine forest; density of tree crowns 0.2; stand age 35–40 years	40
7	Крутые склоны (1–7 м) на коренном берегу р. Вятка / Steep slopes (1 to 7 m) on the root bank of the Vyatka River	Опушка сосняка с примесью ивы бобово-травяного, 5С5И; сомкнутость крон деревьев 0,2; возраст древостоя 35 лет / Edge of a pine forest with an admixture of willow legume-grass ; density of tree crowns 0.2; stand age 35 years	35
8	Крутой склон северо-западной экспозиции правого берега р. Кама / The steep slope of the northwestern exposure of the right bank of the Kama River	Сосняк с примесью ели неморально-травяной, 6С4Е+П; сомкнутость крон деревьев 0,6–0,7; возраст древостоя 70 лет / Pine forest with an admixture of spruce, nemoral-herbal; density of tree crowns 0.6–0.7; stand age 70 years	25

9	Крутой склон северо-западной экспозиции правого берега р. Кама / The steep slope of the northwestern exposure of the right bank of the Kama River	Пихтарник с примесью ели кислично-чернично-травяной, 6ПЗЕ1С; сомкнутость крон деревьев 0,4–0,5; возраст древостоя 70 лет / Fir forest with an admixture of spruce, sour-bilberry-herbal; density of tree crowns 0.4–0.5; stand age 70 years	65
10	Коренной склон южной экспозиции правого берега р. Вятки / The root slope of the southern exposure of the right bank of the Vyatka River	Берёзово-еловый разнотравно-кисличный лес с примесью пихты, 6ЕЗБП; сомкнутость крон деревьев 0,6; возраст древостоя 70 лет / Birch-spruce forb-oxalis forest with an admixture of fir; density of tree crowns 0.6; stand age 70 years	40

Veronica chamaedrys L., *Viola canina* L. s. str., *Melica nutans* L., *Galium mollugo* L., *Asarum europaeum* L., по 50% – *Atragea sibirica* L., *Pyrola rotundifolia* L., *Viola mirabilis* L. Мохово-лишайниковый ярус фрагментарный (покрытие до 45%) – ЦП 1–5, либо сплошной (до 90%) – ЦП 6, в качестве содоминантов выступают *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.

В эколого-ценотических спектрах исследуемых сообществ выделены 6 эколого-ценотических групп (ЭЦГ) (рис. 1). Для большинства изученных фитоценозов с *C. calceolus*, за исключением ЦП 6 и 7, характерно преобладание бореальных видов (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt, *O. secunda*, *A. sibirica*, *R. saxatilis*, *S. virgaurea*, *Galium boreale* L.), на долю которых приходится от

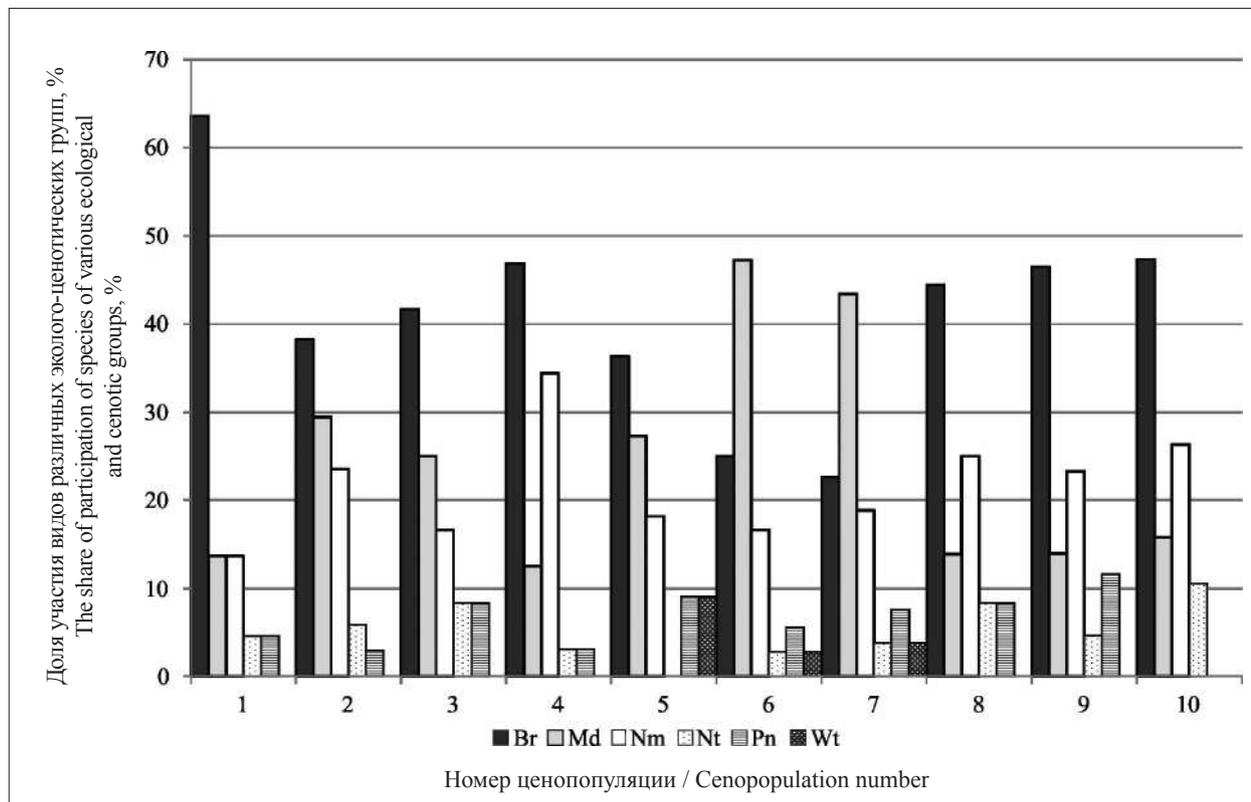


Рис. 1. Эколого-ценотические спектры сосудистых растений в изученных фитоценозах с *Cyripedium calceolus* L. Условные обозначения: Br – бореальная, Md – луговая и лугово-опушечная, Nm – неморальная, Nt – нитрофильная, Pn – боровая, Wt – водно-болотная (гигрофильная)
Fig. 1. Ecological and cenotic spectra of vascular plants in the studied phytocenoses with *Cyripedium calceolus* L. Note: Br – boreal, Md – meadow and meadow-pubescent, Nm – not moral, Nt – nitrophilic, Pn – boric, Wt – wetland (hygrophilic)

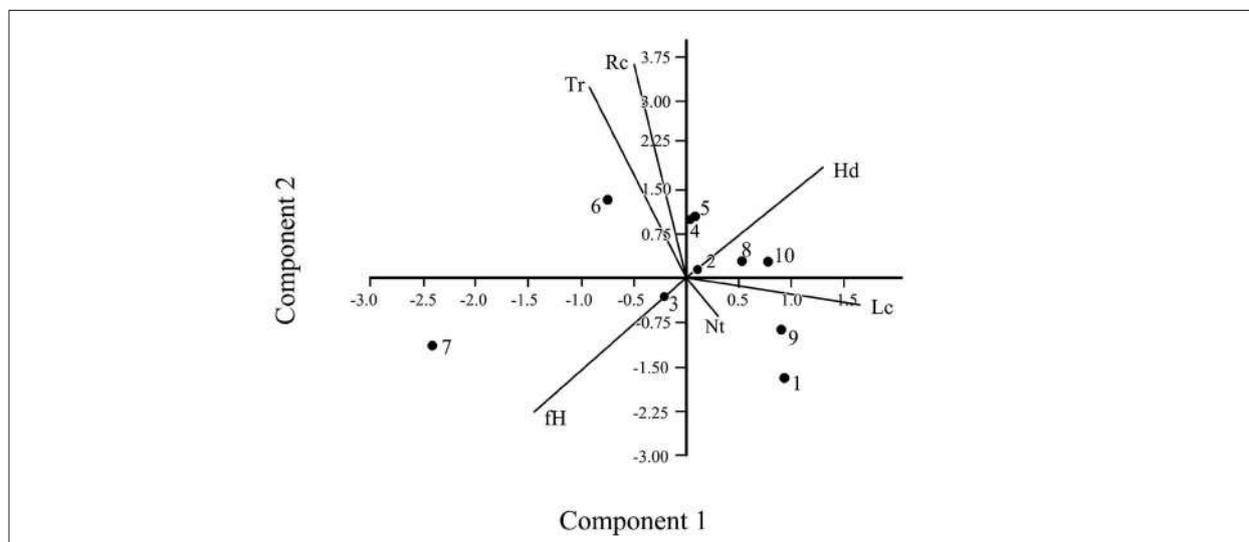


Рис. 2. Положение исследованных биотопов с *Cypripedium calceolus* в системе первых двух главных компонент (PCA – Principal Components Analysis):

Hd – увлажнение, Nt – богатство почв азотом, Tr – солевой режим почв, Rc – кислотность, fH – переменность увлажнения, Lc – освещённость

Fig. 2. The position of the studied biotopes with *Cypripedium calceolus* in the system of the first two main components (PCA – Principal Components Analysis): Hd – moisture, Nt – soil nitrogen richness, Tr – soil salt regime, Rc – acidity, fH – moisture variability, Lc – illumination

38 до 64% видового состава. Относительно широко представлена группа неморальных видов (*V. mirabilis*, *Lathyrus pisiformis* L., *M. nutans*, *Paris quadrifolia* L., *A. europaeum*, *Aegopodium podagraria* L., *Lathyrus vernus* (L.) Bernh.), включающая от 13,6 до 34,4% от общего числа видов. Высокая доля в флористическом составе рассматриваемых растительных сообществ характерна для представителей луговой и лугово-опушечной группы (от 12,5 до 47,2% от общего числа видов). Это такие виды как *V. canina*, *Lathyrus sylvestris* L., *G. mollugo*, *V. chamaedrys*, *Pimpinella saxifraga* L., *Lathyrus pratensis* L.

Максимальное число видов данной ЭЦГ отмечено в ЦП 6 и 7. Эти ЦП изучены в условиях антропогенно-трансформированных биотопов, где луговые и лугово-опушечные виды поселились на пионерной стадии развития фитоценозов и сохраняются в сложных растительных группировках на отвалах в течение длительного временного периода. Несколько меньшее количество видов (от 2,9 до 11,6% от общего числа видов) насчитывает боровая группа (*Vaccinium vitis-idaea* L., *Antennaria dioica* (L.) Gaertn., *Pilosella officinarum* F. Schultz, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn). В ЦП 10 виды боровой ЭЦГ не выявлены. Предпоследнее место по количеству занимают нитрофильные виды (*Poa sylvicola* Guss., *Mentha arvensis* L., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Urtica dioica* L., *Veratrum lobelianum* Bernh.),

составляющие в различных фитоценозах от 0 (ЦП 5) до 10,5% (ЦП 10). Гигрофильные виды (*Calamagrostis langsdorfii* (Link) Trin., *G. conopsea*, *Valeriana officinalis* L.) отмечены только в ЦП 5–7, где доля их участия составляет от 2,8 до 9,1%.

Cypripedium calceolus в рассматриваемых биотопах произрастает на кислых и слабо-кислых почвах (Rc = 6,25–7,35 баллов), по шкале трофности почвы местообитаний соответствуют типам от небогатых до довольно богатых (от 5,40 до 6,28 баллов), по обеспеченности азотом – типу бедных (от 5,10 до 5,70 баллов). Влагообеспеченность находится в диапазоне от сухо-лесолугового до влажно-лесолугового режимов (11,4–12,9 балла) и характеризуется типом увлажнения от слабо переменного до умеренно переменного (от 4,77 до 6,39 баллов). Реализованный диапазон по шкале освещённости-затенения (Lc) расположен в границах от 3,39 до 4,87 баллов: условия полуоткрытых пространств – светлых лесов.

Согласно дифференциации биотопов с *C. calceolus* методом главных компонент, полученных по экологическим шкалам [10], выявлены 2 значимых компонента (рис. 2). Наиболее сильное влияние из рассмотренных факторов на распространение вида оказывают освещённость (63%) и кислотность почвы (15%), которые определяют 78% общей изменчивости.

Таблица 2 / Table 2

Популяционно-демографические показатели исследуемых ценопопуляций *Cypripedium calceolus*
Population and demographic indicators of the studied cenopopulations of *Cypripedium calceolus*

ЦП CP	Онтогенетическое состояние, особи Ontogenetic state, individuals				Численность, ос. Numbers, specimens	Плотность, ос./м ² Density, individuals/м ²	D_e	$I_{\text{возоб.}}^{\cdot}$ % $I_{\text{возоб.}}^{\cdot}$ %	$I_{\text{ген.}}^{\cdot}$ % $I_{\text{ген.}}^{\cdot}$ %	Δ	ω	$\Delta\omega$
	j	im	v	g								
1	25	0	58	44	127	31,8	16,3	73,6	26,4	0,203	0,515	переходная transitional
2	0	3	31	54	88	3,4	2,6	39,0	61,0	0,350	0,770	стареющая aging
3	0	0	115	28	143	9,5	5,9	65,1	34,9	0,252	0,622	переходная transitional
4	0	0	62	146	208	6,1	5,5	30,7	69,3	0,383	0,822	стареющая aging
5	28	136	133	64	361	17,2	10,0	62,4	37,6	0,245	0,579	переходная transitional
6	0	2	9	35	46	4,2	3,9	10,2	89,8	0,460	0,936	стареющая aging
7	0	19	100	147	266	9,2	6,8	44,2	55,8	0,330	0,737	
8	0	0	16	27	43	2,7	2,2	37,2	62,8	0,370	0,801	
9	0	4	26	115	145	3,6	3,2	19,3	80,7	0,426	0,886	переходная transitional
10	0	153	342	267	762	1,1	0,6	65,0	35,0	0,238	0,575	

Примечание: $I_{\text{возоб.}}^{\cdot}$ – индекс возобновляемости (%); $I_{\text{ген.}}^{\cdot}$ – индекс генеративности (%); Δ – индекс возрастности; ω – индекс эффективности; D_e – эффективная плотность особей (ос./м²); плотность – общая плотность, (ос./м²). Онтогенетические состояния: ювенильные (j), имматурные (im), виргинильные (v), генеративные (g).

Note: $I_{\text{возоб.}}^{\cdot}$ – index of renewability (%); $I_{\text{ген.}}^{\cdot}$ – generativity index (%); Δ – age index; ω – efficiency index; D_e – effective density of individuals (os./m²); density – total density, (os./m²). Ontogenetic states: juvenile (j), immature (im), virginal (v), generative (g).

В исследуемых ЦП особи *C. calceolus* распределены неравномерно. Наиболее часто встречаются как единичные побеги, так и немногочисленные группы, представленные 2–3 особями. Многочисленные куртины, включающие 19–24 растений разных онтогенетических групп, редки. Самый крупный популяционный локус из 67 экземпляров описан в ЦП 5. В изученных ЦП выделены от 5 до 40 групповых скоплений вегетативных и генеративных особей *C. calceolus*.

Численность *C. calceolus* в пределах рассматриваемых ЦП варьирует от 43 до 762 особей (табл. 2). Более крупные популяции, до нескольких тысяч побегов, отмечают исследователи на территории Архангельской области [19]. Так же значительное увеличение численности *C. calceolus* наблюдается на техногенно-преобразованных территориях [20] вследствие снижения конкуренции со стороны других видов на таких участках. Общая и эффективная плотность особей *C. calceolus* в большинстве исследованных ЦП характеризуется невысокими значениями (1,1–17,2 и 0,6–16,3 особей/м² соответствен-

но). Максимальные показатели плотности установлены в ЦП 1 – 31,8 особей/м² (табл. 2). Все изученные ЦП *C. calceolus* являются нормальными, неполночленными. В онтогенетической структуре конкретных ЦП выделены два типа спектров – левосторонний и правосторонний (табл. 2). Левосторонний спектр формируется в ЦП 1, 3, 5 и 10, где максимум приходится на имматурные – 37,7% (ЦП 5) или виргинильные особи (ЦП 1, 3, 10 – 45,7, 80,4 и 44,9% соответственно). В большинстве ЦП формируется правосторонний тип спектра, с абсолютным максимумом на генеративных особях (55,3–79,3%). В ЦП 1 и 5 выявлены особи ювенильного онтогенетического состояния, где на их долю приходится 19,7 и 7,8% соответственно. Исследователи из других регионов также отмечают преобладание в ЦП *C. calceolus* онтогенетического спектра правостороннего типа [21] и незначительную долю участия в составе ювенильных и имматурных особей.

Оценка исследованных ЦП по классификации «дельта–омега» (табл. 2) показала, что большинство ЦП являются стареющими

Таблица 3 / Table 3

Характеристика виталитетной структуры *Cyripedium calceolus*
 Characteristics of the vitality structure of *Cyripedium calceolus*

ЦП CP	Доля особей по классам виталитета, % The proportion of individuals of the class of vitality, %			Индекс качества ЦП Q The index of coenopopulation quality Q	Виталитетный тип ценопопуляции Vitality type of coenopopulation
	крупные large, a	средние average, b	мелкие small, c		
1	30,00	63,33	6,67	46,67	процветающая / prospering
2	13,33	66,67	20,00	40,00	
3	14,81	62,96	22,22	38,89	
4	13,33	63,33	23,33	38,33	
5	0,00	16,67	83,33	8,33	депрессивная / depressive
6	0,00	80,00	20,00	40,00	процветающая / prospering
7	0,00	20,00	80,00	10,00	депрессивная / depressive
8	59,26	40,74	0,00	50,00	процветающая / prospering
9	66,67	33,33	0,00	50,00	
10	16,67	50,00	33,33	33,33	

Таблица 4 / Table 4

Показатели природоохранной значимости и состояние изученных ценопопуляций *Cyripedium calceolus*
 Indicators of environmental significance and status of the studied populations of *Cyripedium calceolus*

ЦП CP	A	B	C	D	E	Параметры оценки состояния Parameters of status assessment					Средний балл SC The average score SC
						A	B	C	D	E	
1	1,08	0,45	34,6	127	средний average	2	2	3	3	2	2,4 – зависящая от сохранения conservation dependent
2	0,97	0,27	61,4	88		2	1	1	3	2	1,8 – находящаяся в состоянии, близком к угрожаемому / in a near- threatened state
3	0,98	0,47	19,6	143		2	3	3	3	2	2,6 – зависящая от сохранения conservation dependent
4	1,02	0,46	70,2	208		2	2	1	3	2	2,0 – находящаяся в состоянии, близком к угрожаемому / in a near- threatened state
5	0,79	0,19	17,7	361	сильный strong	3	3	3	2	3	2,8 – зависящая от сохранения conservation dependent
6	0,97	0,26	76,1	46		2	3	1	3	3	2,4 – зависящая от сохранения conservation dependent
7	0,78	0,44	55,3	266		3	2	2	3	3	2,6 – зависящая от сохранения conservation dependent
8	1,19	0,35	62,8	43	средний average	1	2	1	3	2	1,8 – находящаяся в состоянии, близком к угрожаемому / in a near- threatened state
9	1,25	0,45	79,3	145		1	2	1	3	2	1,8 – находящаяся в состоянии, близком к угрожаемому / in a near- threatened state
10	0,96	0,6	35,0	762		2	1	3	1	2	1,8 – находящаяся в состоянии, близком к угрожаемому / in a near- threatened state

Примечание: A – индекс виталитета ценопопуляций (IVC), B – выраженность защитной стратегии, C – доля генеративных особей, %, D – численность, ос., E – уровень антропогенной нагрузки, SC – интегрированный показатель состояния ценопопуляций.

Note: A – the index of coenopopulation vitality (IVC), B – the severity of the protective strategy (R^2_{ch}), C – proportion of generative individuals, %, D – number of individuals, ind., E – level of anthropogenic load, SC – integrated indicator of the state of coenopopulations.

taeva V.Yu., Stavrova N.I., Yarmishko V.T., Yarmishko M.A. Methods of investigation of forest communities. Sankt-Peterburg: Research Institute of Chemistry of Saint Petersburg University Press, 2002. 240 p. (in Russian).

8. Plants of the World Online [Internet resource] <http://www.plantsoftheworldonline.org/> (Accessed: 03.04.2022).

9. Smirnova O.V., Khanina L.G., Smirnov V.E. Ecological and cenotic groups in the vegetation cover of the forest belt of Eastern Europe // Eastern European forests: history in the Holocene and modernity. Book 1. Moskva, 2004. P. 165–175 (in Russian).

10. Tsyganov D.N. Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broadleaved forests. Moskva: Nauka, 1983. 198 p. (in Russian).

11. Fardeeva M.B. Ontogeny of *Cypripedium calceolus* L. Ontogenetic atlas of medicinal plants. Yoshkar-Ola: MarGU, 2002. V. 3. P. 114–120 (in Russian).

12. Kovalenko I.M. Structure of populations of dominants of the grass-shrub tier in forest phytocenoses of the Desnyansky-Starogutsky National Nature Park. I. Ontogenetic structure // Ukrainian Botanical Journal. 2005. V. 62. No. 5. P. 707–714 (in Ukrainian).

13. Zhivotovsky L.A. Ontogenetic states, effective density and classification of plant populations // Ecology. 2001. No. 1. P. 3–7 (in Russian).

14. Vilyaeva N.A. The state of populations of *Platanthera bifolia* (L.) Rich. and *Platanthera chlorantha* (Cust.) Reichenb. (Orchidaceae) in the Smolenskoye Lake National Park // Bulletin of the Russian University of Friendship of Peoples. Ecology and Life Safety Series. 2014. No. 4. P. 5–10 (in Russian).

15. Uranov A.A. Age spectrum of phytocenopopulations as a function of time and energy wave processes // Scientific reports of the Higher School. Biological sciences. 1975. No. 2. P. 7–34 (in Russian).

16. Ishbirdin A.R., Ishmuratova M.M. To assess the state and value of conservation of cenopopulations rare species // Principles and methods of species biodiversity conservation. Yoshkar-Ola: Publishing House of the Mari State University. 2004. P. 150–151 (in Russian).

17. Zlobin Yu.A. Population ecology of plants: current state and points of growth. Sumy: Universitetskaya kniga, 2009. 263 p. (in Russian).

18. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4.

19. Puchnina L.V. Status of *Calypso bulbosa* and *Cypripedium calceolus* (Orchidaceae) populations in the Pinega Nature Reserve // Nature Conservation Research. 2017. V. 2 (Suppl. 1). P. 125–150 (in Russian). doi: 10.24189/ncr.2017.023

20. Zheleznaya E.L. Factors affecting the dynamics of orchid populations // Systematic and floristic studies of Northern Eurasia: Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva: MPGU, 2018. V. 1. P. 212–216 (in Russian).

21. Fardeeva M.B., Lukyanova Yu.A., Shafigullina N.R. Rare orchids in the National Park “Nizhnyaya Kama” and adjacent territories in the north of Tatarstan (European part of Russia), their habitats and state of populations // Ekosistemy. 2020. No. 23. P. 166–182 (in Russian). doi: 10.37279/2414-4738-2020-23-166-182

Выживаемость и репродуктивная ценность разных когорт в популяции ондатры (*Ondatra zibethicus* L.)

© 2022. Н. С. Коротин¹, д. б. н., зав. лабораторией,
В. В. Ширяев², д. б. н., в. н. с.,

¹Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202,

²Всероссийский научно-исследовательский институт
охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б. М. Житкова РАН,
610020, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,
e-mail: nsk@ipae.uran.ru, shiryayev49@mail.ru

Получены количественные оценки ряда демографических параметров популяции ондатры. Исследование основано на данных промысловых проб ондатры (всего 2018 особей) и сведений о плодовитости 868 самок. Проанализированы возрастные распределения ондатры из популяций в дельте реки Или. Впервые изучены изменения удельной выживаемости и репродуктивной ценности разных когорт ондатры на протяжении жизни поколения. Выживаемость самок оказалась несколько выше таковой самцов во всех возрастных группах. Начиная с возраста 1+, выживаемость как самцов, так и самок резко падает. Максимальная удельная выживаемость в возрастном интервале 0+– 1+ характерна для животных первой когорты, минимальная – для второй, самой многочисленной. По мере старения когорты картина соотношения величин удельной выживаемости меняется. В старших возрастных классах максимальная выживаемость свойственна животным последней, третьей когорты. Это приводит, по мере старения поколения, к существенному перераспределению в популяции представительства особей разных когорт в пользу третьей (до 75%). В результате, наибольшее число потомков в течение жизни приносят самки этой когорты (в 1,24–1,57 раза больше, чем представители первой и второй когорты), что свидетельствует о высокой репродуктивной ценности самок третьей когорты и их важности для динамики численности популяции в целом. Значимых различий в плодовитости самок из разных когорт не обнаружено, то есть различия в репродуктивной ценности ондатр, принадлежащих к разным когортам, возникают в связи с разницей в удельной выживаемости. Количество выживших на следующий год представителей первых двух когорт вполне достаточно для формирования родительского ядра популяции в отличие от более мелких полёвок, у которых репродуктивное ядро популяции формируется именно за счёт третьей когорты. Ондатра сохраняет свойственный более мелким полёвкам механизм формирования репродуктивного ядра популяции на следующий год, однако он не имеет для неё определяющего значения.

Ключевые слова: популяция, выживаемость, репродуктивная ценность, динамика численности, когорта, *Ondatra zibethicus*.

Survival and reproductive value of different cohorts in the muskrat population (*Ondatra zibethicus* L.)

© 2022. N. S. Korytin¹ ORCID: 0000-0001-7751-0824[†]
V. V. Shiryayev² ORCID: 0000-0002-4549-5727[†]

¹Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
202, St. 8 Marta, Yekaterinburg, Russia, 620144,

²Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming
of the Russian Academy of Sciences,
79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610020,
e-mail: nsk@ipae.uran.ru, shiryayev49@mail.ru

A few demographic parameters of the muskrat population have been obtained. The study is based on data from trapping muskrat samples (total 2018 individuals) and information on the fertility of 868 females. Variation in the cohort's survival rate and reproductive value were studied for the first time on the basis of the muskrat population age distribution in the Ili River delta. The females specific survival rate was slightly higher than males in all age intervals. Both males and females survival rate was dramatically reduced starting at the age 1+. Maximal specific survival rate in the 0+ – 1+

age interval is typical for animals of the first cohort, minimal – for the second, which is most numerous. The picture of specific survival rate changes as cohort is growing older. In older age classes, the maximum survival rate turn out to last, third cohort. So, in the last age class the largest part of individuals belong to the third cohort (75%). As a result, the largest number of offspring is brought by females of this cohort (1.24–1.57 times more than representatives of the first and second cohorts). This is indicating the highest reproductive value of the third cohort females. No significant discrepancy in the fertility of females from different cohorts were found. That is, differences in the reproductive value of muskrats belonging to different cohorts arise due to the difference in specific survival rate. The number of representatives of the first two cohorts, which survived for the next year, is quite enough to form the population parent number. The muskrat retains the mechanism of forming next year reproductive core, which is typical to small voles, but it does not have a determining value for it.

Keywords: population, survival, reproductive value, dynamics, cohort, *Ondatra zibethicus*.

Для большинства видов мелких полёвок свойственны высокая плодовитость и малая продолжительность жизни (чуть больше года), что, в зависимости от влияния различных факторов, определяет изменения численности популяций. Полёвки могут приносить до трёх и более приплодов за сезон размножения. Однако высокая смертность приводит к тому, что зиму переживает незначительная часть популяции. Более успешному выживанию мелких полёвок способствует механизм задержки роста и созревания у третьей когорты, увеличивающий её продолжительность жизни. Этот механизм разные авторы именуют альтернативными путями развития либо разными типами онтогенеза [1–7]. Ондатра гораздо крупнее, чем серые и лесные полёвки, и масса её превышает среднюю массу последних более чем десятикратно. В соответствии с концепцией r-K-континуума, вид с такими размерами должен иметь существенно более высокую выживаемость и более низкую плодовитость. Работы по проведению подробного демографического анализа популяционных параметров ондатры отсутствуют и выполнены впервые в истории изучения вида. В связи с этим исследование изменений этих параметров у ондатры актуально как с точки зрения изучения механизмов динамики численности видов, так и для использования этих показателей в имитационном моделировании этого процесса. Ондатра – один из немногих относительно долгоживущих видов грызунов, к которому можно применить современные методы демографического анализа.

Цель работы: на примере ондатры получить оценки основных демографических параметров популяции – выживаемости, величины репродуктивного вклада, приспособленности животных, и сопоставить эти параметры у животных, принадлежащих к разным когортам, появившимся в течение одного сезона размножения.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследований послужили данные промысловых проб ондатры ($n = 2018$ особей, в том числе 1044 самца), полученные В.В. Ширяевым в промысловые сезоны 1972–1976 гг. в правобережье дельты р. Или, где уникальная популяция вида исчезла в течение семи лет в связи с усыханием водоёмов из-за зарегулирования стока реки плотиной Капчагайского гидроузла в 1969 г. Сбор проб осуществляли ежегодно в период с середины сентября до середины октября. Отлов животных вели на постоянных ловчих линиях (за исключением 1973 г., когда материал был собран от охотников-промысловиков) с одинаковым промысловым усилием в течение всего периода [9]. Каждая ловчая линия состояла из 100 капканов, ежегодно выставляемых на одном и том же маршруте протяжённостью 2 км. Проверку осуществляли ежедневно, срок экспозиции составлял 5 суток. Для оценки численности и структуры популяции применяли метод суммирующих таблиц [10, 11].

После публикаций В.С. Смирнова в зарубежной литературе появились практически сходные методы оценки численности [12–17]. Метод основан на одновременном использовании сведений о количестве и возрасте животных в промысловых пробах, взятых за несколько лет. Суммирующие таблицы позволяют снизить влияние избирательности отлова на структуру выборки, поскольку у ондатры, как и у ряда других видов грызунов, преимущественно добываются взрослые особи [18]. Метод позволяет получить оценку абсолютной численности и структуры популяции животных, изначально обитавших на данной территории и отловленных не только в первый год их жизни, но и в течение нескольких последовательных лет. Для этого к числу животных, пойманных в год отлова, прибавляется количество животных 2-х, 3-х, 4-х-летнего возраста, пойманных

в последующие три года, но принадлежащих по срокам рождения к определённой когорте. Метод позволяет оценить общее количество животных, обитавших на исследуемой территории, но не пойманных в первый год отлова, и существенно уточнить структуру популяции. Одновременное использование метода ловчих линий при сборе материалов и метода В.С. Смирнова при его обработке позволяет считать оценки численности и структуры популяции, полученные по суммирующим таблицам, достаточно близкими к реальным.

Возраст ондатр определён по комплексной методике с использованием принятых методов [19, 20] и с последующей корректировкой по эталонам зубов ондатр с известным возрастом [21], полученных в результате мечения зверьков. Возраст определяли по относительным признакам – размеру коронки и коренной части зуба [22] в связи с тем, что, как показали исследования [23, 24], использование регистрирующих структур зуба или кости для определения точного возраста у ондатры затруднено. Особенности строения зубной системы у полёвок (постоянный рост в течение жизни) и формирования линий склеивания в костях (мандибуле) позволяют определить возраст ондатры лишь с точностью до года.

При определении показателей выживаемости, удельной выживаемости и прироста численности использовали стандартные приёмы [25, 26]. Оценка численности каждого из возрастных классов в когорте (S_x), полученная с помощью суммирующих таблиц (табл. 1), не требует введения поправки на скорость изменения численности, поэтому выживаемость l_x (вероятность новорожденного или сеголетка дожить до возраста x) определяли по формуле (1):

$$l_x = S_x/S_0, \quad (1)$$

где S_0 – численность сеголетков, S_x – численность возрастных классов 1+; 2+; 3+. Величина x , соответственно, равна 1, 2, 3.

Оценка удельной выживаемости (p_x , выживаемость в единицу времени, в данном случае – за год) получена по формуле (2):

$$p_x = 1 - (l_x - l_{x+1})/l_x. \quad (2)$$

Плодовитость определяли по плацентарным пятнам, сохраняющимся в рогах матки самок в течение сезона размножения. Для повышения точности анализа были привлечены сведения по размножению и демографической

структуре популяции ондатры в 1966–1972 гг., любезно предоставленные сотрудниками Балхашской экспедиции ВНИИОЗ Б.А. Лариным, С.В. Мараковым и Б.Д. Злобиным. В целом, за период с 1966 г. по 1976 г. в анализе были использованы как собственные материалы, так и сведения о плодовитости, полученные от перечисленных выше коллекторов, в сумме составившие выборку численностью 868 взрослых самок, добытых на территории стационара ВНИИОЗ в дельте р. Или. Проводили попарные множественные сравнения среднего числа плацентарных пятен в 6 возрастных группах (три когорты возраста 1+ и три когорты возраста 2+) в каждом сезоне сбора материала. Использовали t -критерий и поправку Холма–Бонферрони. В тексте приведены средние значения плодовитости и ошибки среднего. Репродуктивную ценность (V_x), как специфическое для каждого возраста ожидание будущего потомства, оценивали по формуле 3 [27]:

$$V_x = m_x + \sum (l_{x+1}/l_x) m_{x+1}, \quad (3)$$

где m_x – число самок, рождаемое каждой самкой в возрасте x .

Термин «когорта» употребляли в обычном его понимании, как совокупность особей, родившихся за один непродолжительный промежуток времени [25, 26, 28, 29]. Другими словами, термин «когорта» можно определить как «совокупность особей, родившихся в период массового появления выводков». В сезон размножения у ондатры выделено три таких совокупности. Между волнами интенсивного ценования отчетливо проявляются периоды понижения интенсивности или полного его прекращения длительностью до нескольких недель [30]. В дельте р. Или первая волна интенсивного ценования наступает с последней декады апреля – по май включительно (первая когорта); вторая волна – июнь-июль (вторая когорта), третья волна – август-сентябрь (третья когорта). Термином «поколение» называли совокупность особей, родившихся в текущем сезоне размножения (сумма когорт данного года рождения).

Результаты и обсуждение

Численность ондатры на участке в дельте р. Или сначала возрастала, а затем резко снизилась к концу периода наблюдений из-за обсыхания водоёмов (табл. 1).

Полученные по суммирующей таблице значения численности позволяют считать

среднюю скорость изменения численности за 4 года близкой к нулю. Учитывая, что ондатре присущи достаточно короткие ряды возрастных распределений (животные возрастом 3+ встречаются крайне редко), полагаем, что усреднённое поколение животных, родившихся за четырёхлетний период в 1972–1975 гг. будет соответствовать условно стабильному случаю. Соответствующие показатели выживаемости поколения ондатры приведены в таблице 2.

Максимальная удельная выживаемость характерна для возрастного интервала 0+–1+. За период от момента начала отлова до следующей осени доживает 43,5% ондатр. В следующем возрастном интервале удельная выживаемость резко снижается, до возраста 2+ доживает только 26% однолетних животных. Ещё более резкое снижение удельной выживаемости наблюдается в последнем возрастном интервале – до возраста 3+ доживает только 4,2% двухлетних животных. Принципиально сходная картина изменений удельной выживаемости получена и при обработке материалов [8] из другого региона – дельты р. Амударьи.

Удельная выживаемость самцов и самок сохраняет общее сходство с характером изменений выживаемости, рассчитанной для поколения в целом. Самкам свойственна несколько более высокая удельная выживаемость во всех возрастных классах. Это приводит к некоторому превалированию самок во взрослой (1++) части популяции. Более высокая выживаемость самок, возможно, связана с избирательным (повышенным) отловом самцов из-за особенностей их поведе-

ния – охраной участка, выходом на кормёжку первыми и др.

Наибольшая удельная выживаемость в первый год жизни (0,65) оказалась у первой когорты, наименьшая – у второй (0,36), наиболее многочисленной (табл. 3). Величина выживаемости третьей когорты (0,44) заняла промежуточное положение.

На следующий год удельная выживаемость животных, принадлежащих к первой когорте, падает, и в возрастном интервале 1+–2+ она оказывается наименьшей. До возраста 2+ доживает только около 9% животных 1+ или около 6% от первоначальной осенней численности когорты. Во второй когорте до возраста 2+ доживает 22% животных 1+ или около 8% от первоначальной осенней численности. Удельная выживаемость третьей когорты достаточно высока как в первый год жизни, так и во второй. До возраста 2+ в этой когорте доживает почти половина животных 1+ или 21,8% от первоначальной осенней численности.

Столь резкое изменение удельной выживаемости в разных когортах по мере увеличения возраста приводит к существенному перераспределению доли разных когорт в составе поколения по мере его старения (табл. 4).

Животные, принадлежащие к первой когорте, полностью погибают в течение первых 2-х лет жизни, в то время как особи из второй и третьей когорты доживают до следующего года. Доля самой значительной по численности второй когорты по мере увеличения возраста понижается и составляет четверть от общей численности поколения в последнем

Таблица 1 / Table 1

Добыча и численность ондатры на участке ареала в дельте р. Или
Muskrat harvest and number in the study area (Ili River delta)

Год / Year	1972	1973	1974	1975
Добыча, ос. / Harvest, <i>n</i>	557	151	895	304
Численность, ос. / Number, <i>n</i>	777	636	1088	383

Таблица 2 / Table 2

Оценки выживаемости ондатры для усреднённого поколения из дельты р. Или
Estimation of muskrat whole generation survival rate (Ili River delta)

Возраст Age	Численность возрастных классов S_x , особей Age class number, S_x , <i>n</i>	Выживаемость, l_x Survival, l_x	Удельная выживаемость, p_x Specific survival rate, p_x
0+	422,5	1	0,435
1+	183,75	0,435	0,26
2+	47,75	0,113	0,042
3+	2	0,0047	–

Таблица 3 / Table 3

Удельная выживаемость (p_x) ондатр, принадлежащих к разным когортам
Specific survival rate (p_x) of muskrats belonging to different cohorts

Возрастной класс Age class	1-я когорта / First cohort		2-я когорта / Second cohort		3-я когорта / Third cohort	
	S_x	p_x	S_x	p_x	S_x	p_x
0+	94	0,65	206,7	0,36	180	0,44
1+	61	0,087	74,3	0,22	79,7	0,49
2+	5,3	–	16	0,021	39,3	0,026
3+	–	–	0,3	–	1	–

Таблица 4 / Table 4

Соотношение численностей когорт по мере увеличения возраста поколения
Proportion of cohort number in the each generation age class

Возрастной класс Age class	Численность когорты, % от общей численности поколения Cohort size, % of the total generation		
	1-я / first	2-я / second	3-я / third
0+	19,6	43,0	37,4
1+	28,4	34,6	37
2+	8,8	26,4	64,8
3+	0	24,8	75,2

Таблица 5 / Table 5

Оценка величины репродуктивного вклада разных когорт
Calculation of the different cohorts reproductive value

Возрастной класс Age class	Численность самок, S_x Female number, S_x	m_x^*	$S_x m_x$	Численность новорождённых The number of newborns
1-я когорта / First cohort				
1+	30,5	7,67	233,94	250,32
2+	2,65	6,18	16,38	
2-я когорта / Second cohort				
1+	37,2	7,07	263,00	315,24
2+	8,0	6,41	51,28	
3+	0,15	6,41	0,96	
3-я когорта / Third cohort				
1+	39,9	6,71	267,73	392,34
2+	18,7	6,49	121,36	
3+	0,5	6,49	3,25	

Примечание: * – плодовитость, среднее число самок, рождаемое каждой самкой.
Note: * – fertility, average females number which were born by each female.

(3+) возрастном классе. Доля третьей когорты постепенно увеличивается, и в последнем возрастном классе она равна 75%.

Плодовитость ондатр в разных когортах и в разные годы менялась от $9,13 \pm 0,97$ до $20,62 \pm 3,79$ плацентарных пятен на одну самку. Плодовитость незначительно снижается на втором году жизни у всех когорт. В целом, различия в плодовитости разных когорт не были обнаружены. Тем не менее, репродуктивный вклад каждой когорты в численность потомков, продуцируемых поколением, существенно изменяется (табл. 5). Это происходит

за счёт более высокой выживаемости третьей когорты. Достаточно неожиданным оказался тот факт, что наибольшее число потомков производят в течение всей жизни самки третьей когорты. Они приносят потомков в 1,25 раза больше, чем представители 2-й когорты и в 1,57 раза больше, чем представители 1-й когорты. Соответственно, репродуктивная ценность самок третьей когорты (табл. 5) оказывается наивысшей. Можно полагать, что и приспособляемость животных, принадлежащих к этой когорте, также является наивысшей.

Большой репродуктивный вклад самок третьей когорты в общее число потомков поколения обеспечивается более высокой их выживаемостью. Характерно, что в первый год жизни осенняя численность животных этой когорты меньше численности самой крупной второй когорты и составляет в среднем 37,5% от общей численности сеголетков.

Высокую удельную выживаемость третьей когорты в первый год жизни отчасти можно объяснить сравнительно слабой промысловой нагрузкой на неё. Гораздо труднее найти объяснение высокой удельной выживаемости представителей третьей когорты во взрослом состоянии, когда эти ондатры практически не отличаются по размерам от представителей остальных когорт. Априори можно предположить, что, по крайней мере, промысловая компонента смертности у этих животных должна была быть одинаковой с представителями других когорт.

Достижение высокой приспособленности животными третьей когорты, скорее всего, объясняется не генетическими, а иными причинами, поскольку в формировании этой когорты участвуют родители, родившиеся в предыдущем году и принадлежащие ко всем трём когортам. Ондатра, как и многие другие грызуны, является полициклическим видом. Но у ондатры, как правило, в отличие от разных когорт более мелких родственников – серых и лесных полёвок, – сеголетки не размножаются, или в размножении участвует очень небольшая доля особей первой когорты – 2–8% в среднем, максимально до 10–15% [30]. То есть фактически все когорты формируются, в основном, одними и теми же родителями.

По-видимому, высокий уровень приспособленности животных третьей когорты связан с замедлением роста и развития животных этой когорты в зимний период на первом году жизни, как это происходит у мелких видов полевок [31, 32].

Оценивая удельную выживаемость двух первых когорт ондатры в первый год жизни как весьма высокую и вполне достаточную для продуцирования необходимого количества потомков на следующий год по сравнению с более мелкими видами полевок, мы полагаем, что феномен большей приспособленности третьей когорты является неким «демографическим излишеством» для ондатры. Вполне возможно, что в более суровых условиях (скажем, в высоких широтах) это «излишество» может оказаться единственным фактором, опреде-

ляющим способность ондатры к освоению подобных биотопов и сохранению популяции. Отметим, что появление (формирование) третьей когорты чаще происходит в южных широтах, чем в северных, что связано, как утверждают многие авторы, с продолжительностью периода с плюсовой температурой. Тем не менее, третья когорта формируется не только на юге ареала, но также в его центральной и северной части. Собранные в монографии «Ондатра» [30] информация о числе помётов у самок (таблица 53 монографии) из 24 участка ареала свидетельствует о том, что три когорты в популяции формировались на 16 участках, в том числе, включая Архангельскую и Вологодскую области и ряд областей умеренной зоны. На наш взгляд, фактор высокой приспособленности животных третьей когорты во многом способствовал быстрому распространению ондатры после интродукции на огромном ареале в Евразии.

Заключение

В результате предпринятого исследования получены новые, неизвестные ранее, величины популяционных параметров ондатры, характеризующие демографические особенности разных когорт. Выявлено, что статистические отличия в плодовитости животных разных когорт отсутствуют. Средняя для всей популяции выживаемость непостоянна; максимальная – свойственна животным в возрастном интервале 0+–1+; по мере старения поколения удельная выживаемость резко уменьшается. Среди трёх когорт, формирующихся в поколении, максимальная средняя удельная выживаемость характерна для представителей третьей когорты. Это приводит к тому, что на втором–третьем году жизни доля третьей когорты в общей численности поколения оказывается наибольшей.

Получены данные, свидетельствующие о том, что репродуктивный вклад третьей когорты в общее число потомков, производимых поколением в течение жизни, оказывается максимальным. Соответственно, и репродуктивная ценность самок третьей когорты для сохранения популяции оказывается наивысшей. При этом третья когорта у ондатры не играет в популяции сколько-нибудь явной функциональной роли, характерной для последней когорты более мелких полевок и заключающейся в создании репродуктивного ядра популяции на следующий год. У ондатры сохраняется специфичный для полевок механизм, обе-

спечаивающий восстановление численности популяции на следующий год, но при этом продолжительность жизни третьей когорты кратно выше, чем у серых и лесных полёвок.

Проведённые исследования позволили выявить и оценить количественно фундаментальные демографические особенности вида *Ondatra zibethicus*, что позволяет использовать их при имитационном моделировании динамики численности вида и внести коррективы в некоторые теоретические представления, в частности, в концепцию r-K-континуума.

Работа выполнена по государственному заданию (коды тем FУWU-2022-0014 и FNWS-2022-0001).

References

1. Shwartz S.S., Olenev V.G., Kryazhimskiy F.V., Zhigalskii O.A. The study of population dynamics and age structure of the population of rodents on the simulation model // Doklady AN SSSR. 1976. V. 228. No. 6. P. 1482–1484 (in Russian).
2. Shwartz S.S., Olenev V.G., Zhigalskii O.A., Kryazhimskiy F.V. The study of seasonal generations of rodents on the simulation model // Russian Journal of Ecology. 1977. No. 3. P. 12–21 (in Russian).
3. Olenev V.G., Pokrovskiy A.V., Olenev G.V. Analysis of hibernating generations of rodents // Adaptatsii zhivotnykh k zimnim usloviyam. Moskva: Nauka, 1980. P. 64–69 (in Russian).
4. Kryazhimskiy F.V. The mechanism of formation of alternative types of growth and the survival of rodents // Zhurnal obschey biologii. 1989. V. 50. No. 4. P. 481–490 (in Russian).
5. Olenev G.V. Alternative types of ontogeny in cyclomorphic rodents and their role in population dynamics (an ecological analysis) // Russian Journal of Ecology. 2002. No. 5. P. 341–350 (in Russian). doi: 10.1023/A:1020213709830
6. Olenev G.V., Grigorkina E.B. Functional structure in populations of small mammals (radiobiological aspect) // Russian Journal of Ecology. 1998. No. 6. P. 447–451 (in Russian).
7. Olenev G.V., Grigorkina E.B. Functional patterns of life activities of rodent populations in the winter season // Russian Journal of Ecology. 2014. No. 6. P. 428–438 (in Russian).
8. Korsakova I.B. Age and sex structure of the muskrat population in the Primorsky region of the Amudarya river delta // Voprosy ekologii promyslovykh zhivotnykh. Moskva: Lesnaya promyshlennost', 1969. P. 33–46 (in Russian).
9. Larin B.A. Studying changing of population density and population composition of muskrat using constant hunting lines // Questions of zoology: Materialy k 3 soveshchaniyu zoologov Sibiri. Tomsk, 1966. P. 208–209 (in Russian).
10. Smirnov V.S. Methods of counting mammals population // Trudy Instituta biologii UFAN SSSR. V. 39. Sverdlovsk: Sredne-Ural'skoye knizhnoye izdatelstvo, 1964. 88 p. (in Russian).
11. Smirnov V.S. Analysis of Arctic fox population dynamics in Yamal and ways of hunting intensification // Problemy Severa. 1967. No. 11. P. 70–90 (in Russian).
12. Lowe V. Population dynamics of the red deer (*Cervus elaphus* L.) on Rhum // Journal of Animal Ecology. 1969. V. 38. No. 2. P. 425–457. doi: 10.2307/2782
13. Woolf A., Harder J. Population dynamics of a captive white-tailed deer herd with emphasis on reproduction and mortality // Wildlife Monographs. 1979. No. 67. P. 3–53.
14. Downing R. Vital statistics of animal populations / Ed. S. Schemnitz // Wildlife management techniques manual. The Wildlife Society, 1980. P. 247–267.
15. Fryxell J., Mercer W., Gellately R. Population dynamics of Newfoundland moose using cohort analysis // Journal of Wildlife Management. 1988. V. 52. No. 1. P. 14–21. doi: 10.2307/3801050
16. Ferguson S. Use of cohort analysis to estimate abundance, recruitment and survivorship for Newfoundland moose // Alces. 1993. V. 29. P. 99–113.
17. Gove N., Skalski J., Zager P., Townsend R. Statistical models for population reconstruction using age-at-harvest data // Journal of Wildlife Management. 2002. V. 66. No. 2. P. 310–320. doi: 10.2307/3803163
18. Smirnov V.S., Korytin N.S. Selectivity of catching animals and opportunities of its using in ecological research: Preprint of the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Center of the Academy of Sciences. Sverdlovsk, 1979. 78 p. (in Russian).
19. Tsygankov D.S., The method for determining the age and life span of muskrats (*Ondatra zibethica*) // Zoologichesky zhurnal. 1955. V. 34. No. 3. P. 640–651 (in Russian).
20. Nikiforov L.P. Experience in determining the age of the muskrat in the field // Ratsionalizatsiya okhotnichego promysla. 1958. No. 7. P. 137–141 (in Russian).
21. Korsakova I.B. Methods for age determination in the muskrat by using reference teeth // Hunting. Questions of biology and hunting of hunting animals. Kirov: Volgo-Vyatskoe knizhnoye izdatelstvo, 1970. V. 22. No. 52. P. 85–91 (in Russian).
22. Smirnov V.S., Shwartz S.S. The comparative ecological and physiological characteristics of the muskrat in the forest steppe and the near-polar areas // Trudy Instituta biologii UFAN SSSR. Sverdlovsk: RISO UFAN SSSR. 1959. No. 18. P. 91–139 (in Russian).
23. Klevezal G.A. Recording structures of mammals in zoological research. Moskva: Nauka, 1988. 288 p. (in Russian).

24. Klevezal G.A. Principles and methods of age determination of mammals. Moskva: KMK, 2007. 283 p. (in Russian).
25. Caughley G. Analysis of vertebrate populations. Moskva: Mir, 1979. 362 p. (in Russian).
26. Skalski J., Ryding K., Millspaugh J. Wildlife demography. Analysis of sex, age and count data. Hardbound: Acad. Press., 2005. 656 p.
27. Pianka E. Evolutionary ecology. Moskva: Mir, 1981. 400 p. (in Russian).
28. Bigon M., Kharper Dzh., Taunsend K., Ecology. Individuals, populations and communities V. 1. Moskva: Mir, 1989. 667 p. (in Russian).
29. Shilov I. A. Ecology. Moskva: Vyshaya shkola, 2003. 512 p. (in Russian).
30. Muskrat. Morphology, sistematics, ecology / Eds. V.E. Sokolova, N.P. Lavrova. Moskva: Nauka, 1993. 542 p. (in Russian).
31. Shwarts S.S. Ecological regularities of the evolution. Moskva: Nauka, 1980. 277 p. (in Russian).
32. Zejda J. Differential growth of three cohorts of the bank vole *Clethrionomys glareolus* // Zool. Listy. 1971. V. 20. No. 3. P. 229–245.

Влияние различных способов лесной рекультивации на восстановление сообщества млекопитающих черневой тайги

© 2022. Е. М. Лучникова¹, к. б. н., доцент, **В. Б. Ильяшенко¹**, к. б. н., доцент,
А. В. Ковалевский^{1,2}, к. б. н., доцент, С. И. Гашков³, к. б. н., зав. музеем,
Л. А. Воронина³ к. б. н., зав. биостанцией, К. С. Зубко¹, ведущий инженер,
А. В. Филиппова¹, к. б. н., доцент,

¹Кемеровский государственный университет,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6,

²Томский сельскохозяйственный институт – филиал Новосибирского ГАУ,
634050, Россия, г. Томск, ул. Карла Маркса, д. 19,

³Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, д. 36,
e-mail: lut@yandex.ru, passer125@yandex.ru

Проведённые исследования рекультивированных 35–40 лет назад участков горных отвалов угольных предприятий Кемеровской области показывают, что формируемые лесные насаждения не создают полноценных условий для млекопитающих – обитателей черневой тайги. Наибольшее сходство с коренными сообществами млекопитающих выявлено в насаждениях, примыкающих к черневой тайге. Самыми обеднёнными по видовому составу млекопитающих и по показателям их численности оказались террасированные участки с незначительным нанесённым почвенным слоем, рекультивированные берёзой повислой и облепихой крушиновидной. Сформировавшиеся здесь сообщества мелких млекопитающих показывают фаунистическое сходство не с исходным таёжным населением, а с населением суходольных лугов. Млекопитающие крупных и средних размеров на рекультивированных участках малочисленны, либо отсутствуют вовсе. Таким образом, применяемые до настоящего времени методы биологической рекультивации не учитывают потребность фаунистического компонента биоценоза и противоречат сложившимся представлениям о сохранении биоразнообразия. Создаваемые в рамках рекультивации леса должны выполнять кормовую и защитную функции для животных. Поэтому следует отказаться от монопосадок и использовать мозаичное высаживание различных групп растений с чередованием хвойных, смешанных и лиственных лесных площадок с долей различных кустарников около 50%. Так как животные концентрируются на экотонных участках, при проведении лесной рекультивации необходимо предусмотреть формирование протяжённой опушечной линии, то есть закладывать «лесные поляны», окружённые древесными растениями и кустарниками.

Ключевые слова: добыча угля, лесовосстановление, Кузнецкий бассейн, Кузбасс, флора, фауна, биоразнообразие.

Influence of various methods of forest reclamation on the restoration of the community of mammals in the dark coniferous taiga forests

© 2022. E. M. Luchnikova¹ ORCID: 0000-0002-8245-4588, **V. B. Ilyashenko¹** ORCID: 0000-0002-6456-4855,
A. V. Kovalevskiy^{1,2} ORCID: 0000-0001-6561-8272, S. I. Gashkov³ ORCID: 0000-0001-9620-5147,
L. A. Voronina³ ORCID: 0000-0002-9820-7047, K. S. Zubko¹ ORCID: 0000-0003-2417-7575,
A. V. Filippova¹ ORCID: 0000-0003-2117-1258

¹Kemerovo State University,
6, Krasnaya St., Kemerovo, Russia, 650000,

²Tomsk Agricultural Institute,
19, Karla Marksa St., Tomsk, Russia, 634050,

³National Research Tomsk State University,
6, Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050,
e-mail: lut@yandex.ru, passer125@yandex.ru

The restoration of natural communities on anthropogenically disturbed lands is one of the world's problems. Our studies in Kuzbass show that even after 35–40 years, areas reclaimed in different ways do not create full-fledged conditions for mammals, inhabitants of the dark coniferous taiga forests. In all studied areas, the indices of the abundance and

species richness in mammalian communities are significantly inferior to the original taiga communities. The similarity with indigenous communities of mammals was found in pine plantations adjacent to self-growing deforested areas of the dark coniferous taiga. These habitats are characterized by the highest indices of abundance and species richness among the studied sites. The most impoverished in terms of the species richness of small mammals and their number were terraced areas with a very insignificant soil layer, reclaimed by the European white birch *Betula pendula* Roth. and sea-buckthorn *Hippophae rhamnoides* L. The communities of small mammals that have formed here show a faunistic similarity with the population of dry meadows on the place of the felled dark coniferous taiga, but not with the indigenous taiga population. Large and medium-sized mammals in reclaimed areas are few or absent altogether. The reclamation methods should involve the formation of forage and protective functions for forest dwellers. During reclamation, it is necessary to abandon mono-plantings. To create vital conditions, it is necessary to mosaic planting of various groups of plants with the obligatory alternation of coniferous, mixed, and deciduous forest areas. The share of various shrubs is about 50%. Since animals are concentrated in ecotone areas, when carrying out forest reclamation, it is necessary to provide for the formation of an extended forest edge line, that is, to lay "forest glades" surrounded on all sides by woody plants and shrubs.

Keywords: coal mining, reforestation, Kuznetsk Basin, Kuzbass, flora, fauna, biodiversity.

Восстановление лесных биоценозов промышленно-освоенных территорий является одной из насущных проблем мирового сообщества. Зачастую, после окончания добычи полезных ископаемых нарушенную территорию бросают, а естественные процессы самовосстановления на ней протекают крайне медленно. Даже если биологическая рекультивация и проводится, то современные методы зачастую носят разовый характер, и при этом высаживается очень ограниченный набор растений. Формируемые маловидовые сообщества даже спустя многие годы не достигают и половины биологического разнообразия исходных биоценозов [1, 2]. Особенно остро стоит проблема заселения этих биотопов различными животными [3–9]. Подобная ситуация сложилась и в Кемеровской области на территории Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасс), где проблема сохранения биологического разнообразия стоит особенно остро из-за интенсивной добычи каменного угля.

Целью данной работы являлась оценка эффективности применяемых способов лесной рекультивации с позиции восстановления исходного фаунистического сообщества.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в 2019–2020 гг. в Кемеровском районе Кемеровской области в окрестностях с. Андреевка на отвалах угольных предприятий. Всего было заложено пять мониторинговых площадок на участках, подвергшихся лесной рекультивации 30–40 лет назад, и две контрольных.

Площадка 1 «Сосна» (55°29'24,4" с. ш., 86°10'58,3" в. д.) – лесная рекультивация отвалов сосной обыкновенной *Pinus sylvestris* L. Подстилка из многолетнего соснового опада. Толщина наносного гумусового горизонта около 5–10 см.

Площадка 2 «Берёза» (55°28'54,0" с. ш., 86°10'23,0" в. д.) – террасированные отвалы, неудачно рекультивированные берёзой повислой *Betula pendula* Roth. Подстилка из разложившегося и неразложившегося опада. Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта составляет менее 5 см.

Площадка 3 «Облепиха» (55°28'42,0" с. ш., 86°10'39,0" в. д.) – склоны затопленного карьера, рекультивированные облепихой крушиновидной *Hippophae rhamnoides* L. Почвогрунты аналогичны площадке 2.

На площадках 1–3 на отдельных участках почвообразование находится на стадии выветривания горных пород.

Площадка 4 «Ива» (55°28'22,0" с. ш., 86°11'29,0" в. д.) – выположенный участок, рекультивированный различными видами рода ивы *Salix* L. Во время рекультивации произведено нанесение гумусового горизонта мощностью 0,5–1,5 м. Напочвенный покров хорошо развит. Почвообразовательные процессы протекают интенсивно. Активный слой составляет более 20 см.

Площадка 5 «Луг» (55°28'59,0" с. ш., 86°9'54,0" в. д.) – суходольный разнотравно-злаковый луг – вторичное сообщество на месте вырубленной тайги, примыкающее к отвалам горных пород. Почва дерновая. Напочвенный покров хорошо развит.

Площадка 6 «Контроль 1» (55°27'39,8" с. ш., 86°14'45,7" в. д.) – контрольный участок малонарушенной черневой тайги (осиновпихтовый лес), примыкающий к рекультивированным территориям. Почвы – дерново-подзолистые суглинистые. Выбор данного контрольного участка обусловлен тем, что горные работы, а затем рекультивационные мероприятия проводились изначально на сходных участках черневой тайги, а сложившееся здесь сообщество млекопитающих рассматривается нами как коренное.

Площадка 7 «Контроль 2» (54°45'25,2" с. ш., 87°01'38,0" в. д.) – контрольный участок малонарушенной черневой тайги в окрестностях биологической станции «Ажendarово» на территории Бунгарапско-Ажendarовского заказника. С этого участка привлечены материалы многолетних (1978–2020 гг.) мониторинговых исследований млекопитающих в ненарушенной черневой тайге [10].

Относительная численность мелких млекопитающих оценивалась с помощью 50-метровых ловчих канавок с пятью ловчими цилиндрами. На каждой площадке было заложено по одной учётной канавке, работавших с 11 июня по 8 июля 2020 г. Для выявления абсолютной численности на контрольной площадке в черневой тайге помимо канавки относительного учёта была заложена площадка абсолютного учёта размером 0,25 га [11].

Фаунистическое сходство сообществ мелких млекопитающих оценивали при помощи коэффициента Съеренсена-Чекановского, индекс биологического разнообразия – при помощи критерия Симпсона.

Для млекопитающих средних и крупных размеров в феврале 2020 г. были проведены

зимние маршрутные учёты длиной 5–12 км. Учёту подвергались следы животных, пересекающие учётный маршрут, оставленные на снегу за последние сутки [12].

Результаты и обсуждение

На исследованных площадках выявлено 23 вида мелких млекопитающих, из которых 22 характерны для черневой тайги (21 вид – «Ажendarово», 17 видов – «Андреевка»). В естественных ландшафтах равнинной черневой тайги исследуемого региона сообщество мелких млекопитающих характеризуется высоким видовым богатством и разнообразием (рис. 1).

Обе контрольные площадки, в заказнике и на участках, примыкающих к рекультивированным территориям, несмотря на естественные циклические колебания численности отдельных групп или отдельных видов мелких млекопитающих по годам и их пространственной разобщённости, показали высокую степень фаунистического сходства – коэффициент Съеренсена-Чекановского составил 0,91. Это свидетельствует об устойчивом характере

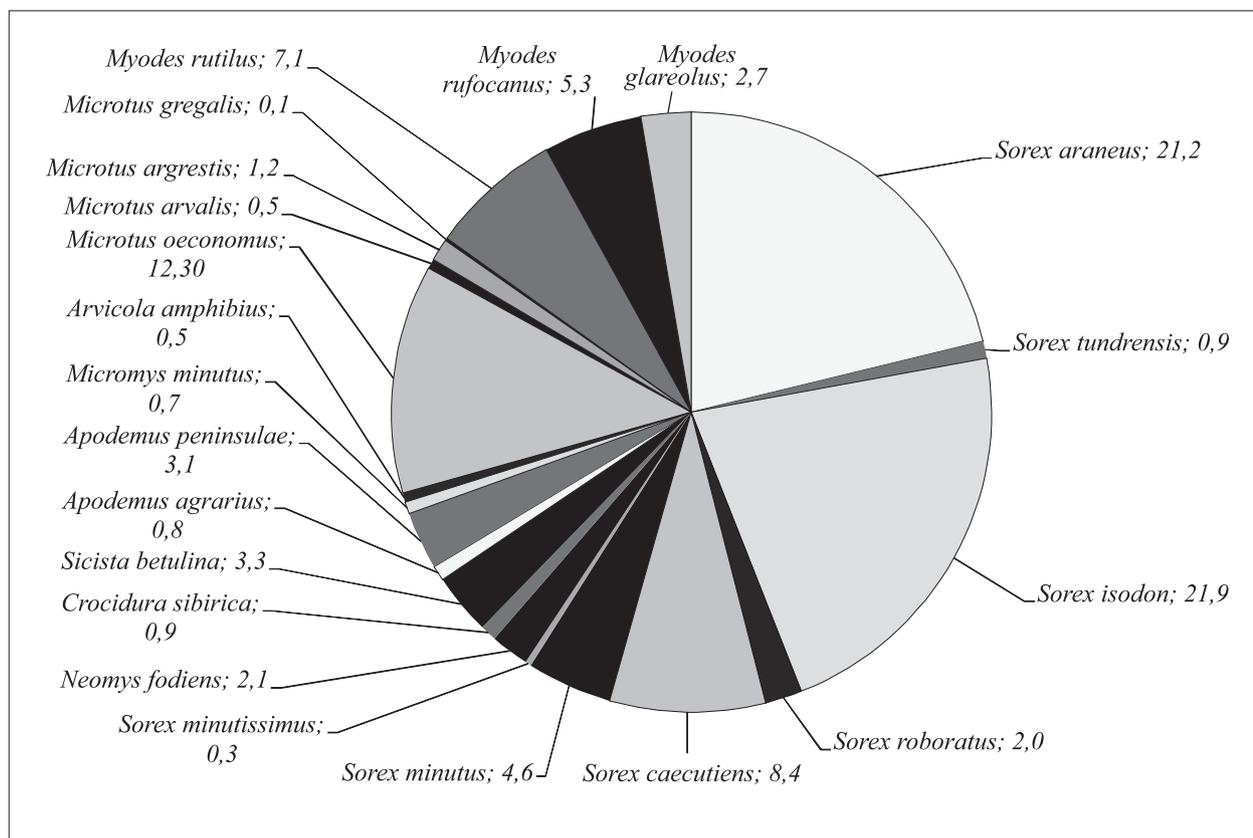


Рис. 1. Структура сообщества мелких млекопитающих в ненарушенной черневой тайге в среднем течении р. Томь (окрестности биологической станции «Ажendarово», 1978–2020 гг.), в %
Fig. 1. The structure of the community of small mammals in the undisturbed dark coniferous taiga in the middle reaches of the Tom River (Azhendarovo Biological Station, 1978–2020), in %

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики сообществ мелких млекопитающих на рекультивированных и контрольных участках / Main characteristics of the communities of small mammals in reclaimed and control sites

Площадка Site	Количество видов Number of species	Индекс биологического разнообразия Симпсона Simpson's diversity index	Индекс полидоминантности Polydominance index	Абсолютная численность мелких млекопитающих, ос./га The absolute number of small mammals, specimens per hectare
1	13	0,76	4,12	628
2	7	0,69	4,67	144
3	7	0,64	6,23	93
4	12	0,66	5,94	417
5	7	0,57	4,28	216
6	17	0,75	4,05	888
7	21	0,89	7,02	746

Таблица 2 / Table 2

Показатели относительной численности мелких млекопитающих на рекультивированных и контрольных площадках, ос./100 цилиндро-суток / Relative abundance of small mammals at reclaimed and control sites, specimens per 100 traps-days

Вид / Species	Биотопические преференции Biotopic preferences	Исследованные площадки / Studied sites						
		рекультивированные / reclaimed					контрольные control	
		1	4	2	3	5	6	7
<i>Sorex isodon</i>	лесной / forest	26,43	6,43	1,43	1,43	1,43	48,57	21,92
<i>Sorex caecutiens</i>		10,71	0,71	–	0,71	1,43	10,71	8,36
<i>Myodes rufocanus</i>		–	–	–	–	–	12,86	5,34
<i>Sicista betulina</i>		–	–	–	–	–	3,36	3,30
<i>Apodemus peninsulae</i>		0,71	–	–	–	–	1,12	3,11
<i>Microtus agrestis</i>		0,71	–	–	–	–	–	1,19
<i>Sorex araneus</i>	эвритопный / eurytopic	22,14	9,29	0,71	0,71	5,71	19,29	21,22
<i>Myodes rutilus</i>		2,14	–	0,71	0,71	0,71	5,71	7,14
<i>Microtus oeconomus</i>	околоводный / near water	1,43	1,43	–	0,71	0,71	6,43	12,3
<i>Neomys fodiens</i>		0,71	0,71	–	–	–	1,43	2,08
<i>Arvicola amphibius</i>		–	–	–	–	–	–	0,52
<i>Arvicola amphibius</i>		–	–	–	–	–	–	0,52
<i>Sorex minutus</i>	лесолуговой / forest- meadow	4,29	4,29	2,14	1,43	3,57	4,29	4,61
<i>Myodes glareolus</i>		0,71	1,43	–	–	–	0,67	2,71
<i>Crocidura sibirica</i>		–	0,71	–	–	–	1,79	2,08
<i>Sorex roboratus</i>		2,86	4,29	–	–	–	0,9	2,01
<i>Micromys minutus</i>		–	–	0,71	–	–	0,22	0,66
<i>Sorex minutissimus</i>		–	–	–	–	–	–	0,32
<i>Talpa altaica</i>		–	–	–	0,71	–	0,71	0,01
<i>Sorex tundrensis</i>	луговой / meadow	0,71	5,00	3,57	–	–	0,71	0,91
<i>Apodemus agrarius</i>		0,71	–	–	–	–	–	0,79
<i>Microtus arvalis</i>		–	–	–	–	–	–	0,54
<i>Microtus gregalis</i>		–	2,86	–	–	1,43	1,43	0,12
<i>Cricetus cricetus</i>		–	0,71	0,71	–	–	–	0,001
Насекомоядные / Insectivores		67,85	31,43	7,85	4,99	12,14	88,4	63,52
Грызуны / Rodents		6,41	6,43	2,13	1,42	2,85	31,8	37,72

Примечание: «–» – вид отсутствует в отловах.
Note: “–” – the species is absent in captures.

коренного сообщества млекопитающих. Здесь же, в черневой тайге, отмечены максимальные показатели абсолютной численности (плотности) населения в 888 (контроль 1) и 746 особей на гектар (ос./га) (контроль 2), а также зафиксированы наиболее высокие показатели видового богатства и видового разнообразия (табл. 1, 2).

Сравнивая основные экологические характеристики населения рекультивированных участков, можно утверждать, что все сформировавшиеся на рекультивированных территориях сообщества мелких млекопитающих заметно уступают контрольным по показателям видового богатства и уровня численности.

Наибольшее фаунистическое сходство изучаемых сообществ с коренными (рис. 2, 3) наблюдается в сосновых посадках, примыкающих к коренным таёжным лесам (площадка 1). Среди всех рекультивированных площадок показатели абсолютной численности здесь максимальны, но всё же уступают таковым на контрольных участках тайги (табл. 1) и сопоставимы с показателями численности в естественных сосновых борах правобережья р. Томь [13]. Такой тип сообществ может быть обусловлен двумя группами факторов: достаточной толщиной наносного почвенного слоя, которая создаёт условия для питания и зимовок зверьков; расселением молодых особей с примыкающих участков черневой тайги.

Один из самых низких показателей абсолютной численности мелких млекопитающих был отмечен на площадке 2 «Берёза» – в 6 раз

ниже, чем в черневой тайге. На наш взгляд, существует как минимум две причины формирования столь обеднённых сообществ мелких млекопитающих. Во-первых, на территории Сибири лиственные леса, и в особенности берёзовые, независимо от их происхождения, являются наименее предпочитаемыми биотопами для мелких млекопитающих [14]. Во-вторых, на исследованных участках сформировался комплекс неблагоприятных эдафических факторов – почти полное отсутствие почвенного слоя, что очень важно для большинства мелких млекопитающих. Так, на площадке 3 «Облепиха», рекультивированной без нанесения почвенного слоя, за 29 дней работы канавки было поймано всего 9 особей мелких млекопитающих 7 видов. Настолько низкая численность мелких млекопитающих, представленных разными видами, свидетельствует о попытках заселения данной площадки животными с прилегающих участков. Однако отсутствие благоприятных условий не позволяет им закрепиться и нарастить численность на новой территории. Аналогичная ситуация наблюдалась и на площадке, рекультивированной берёзой повислой без нанесения достаточного количества почвенного слоя.

Привлекательность территорий, рекультивированных с использованием различных растений, для крупных млекопитающих оценивалась в зимнее время (табл. 4). Учитывая относительно небольшие площади рекультивированных участков, которые существенно

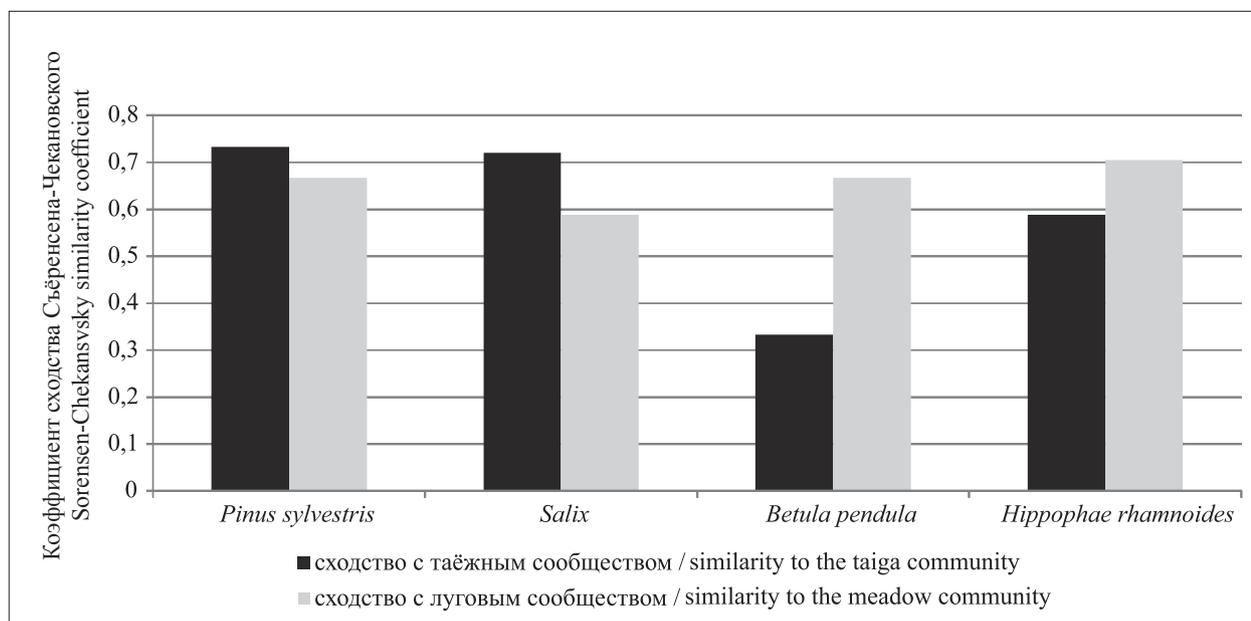


Рис. 2. Фаунистическое сходство сообществ мелких млекопитающих на рекультивированных участках и в естественных ценозах
 Fig. 2. The faunistic similarity of communities of small mammals of reclaimed areas and natural habitats

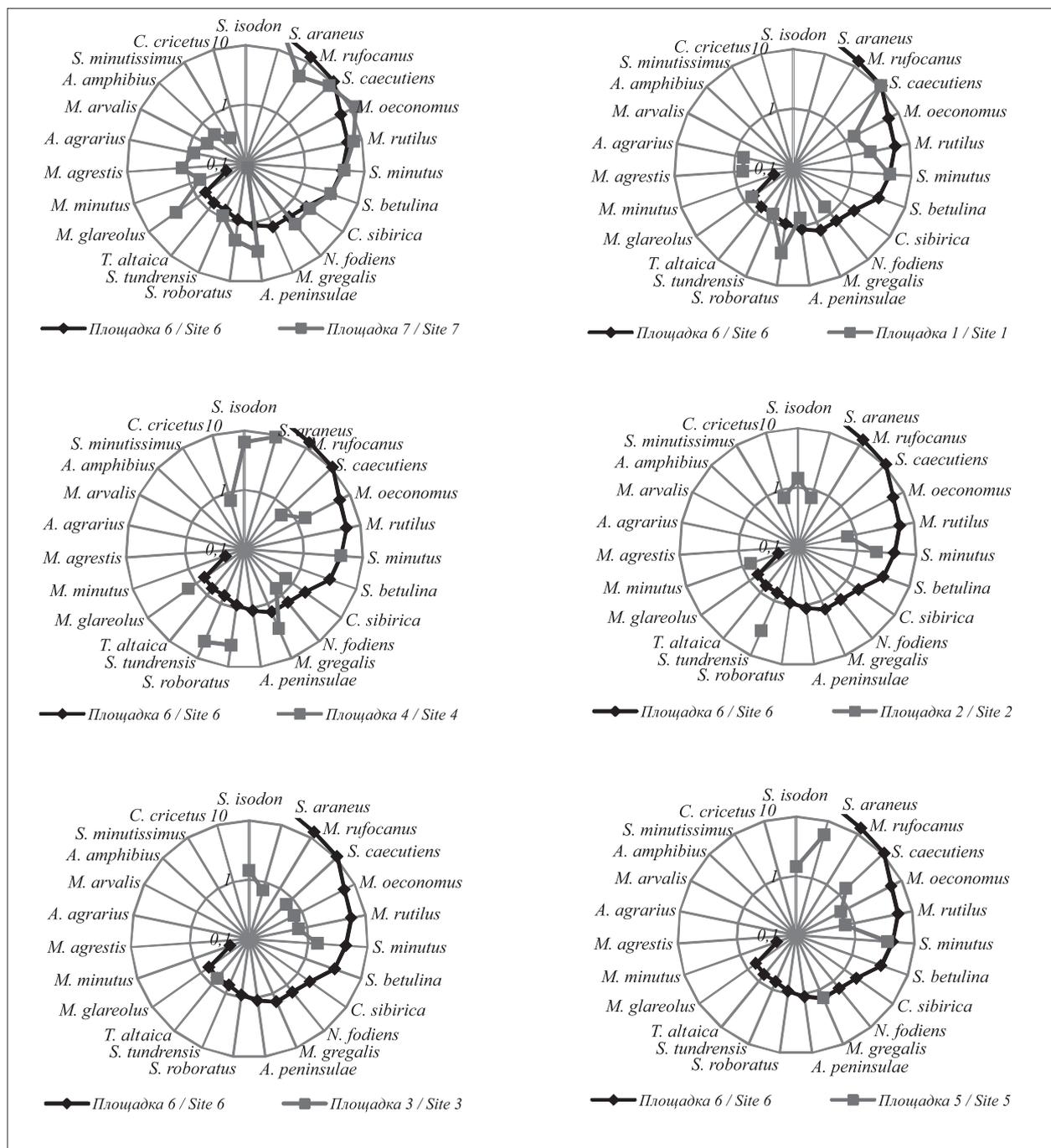


Рис. 3. Характер видо-количественного соответствия сообществ мелких млекопитающих исследуемых площадок относительно контроля
Fig. 3. The rates of the species and quantitative compliance of the communities of small mammals of the studied sites relative to the control

меньше индивидуальных участков у крупных видов зверей, мы можем охарактеризовать лишь основные тенденции привлекательности сформировавшихся биотопов. Малонарушенные участки осиново-пихтовых лесов (коренные сообщества) характеризуются животным населением, типичным для равнинной черневой тайги (контроль 1). Здесь отмечены: заяц-беляк *Lepus timidus* (Linnaeus,

1758); косуля сибирская *Capreolus pygargus* (Pallas, 1771); лисица обыкновенная *Vulpes vulpes* Linnaeus, 1758; колонок *Mustela sibirica* Pallas, 1773. Погрызы на стволах указывают на обитание речного бобра *Castor fiber* Linnaeus, 1758. На контрольном участке черневой тайги в Бунгарапско-Ажандаровском заказнике (контроль 2) были отмечены: соболь *Martes zibellina* Linnaeus, 1758; степной хорь *Mustela*

Таблица 4 / Table 4

Расчётная плотность промысловых зверей на различных участках рекультивации в феврале 2020 г.
Estimated density of hunting animals in different areas of reclamation in February 2020

Вид Species	Расчётная численность на исследованных площадках, ос./1000 га Estimated density on studied sites, specimens per 1000 hectares				
	рекультивированные reclaimed			черневая тайга dark coniferous taiga	
	Номера площадок / No. of sites				
	1	2	3	6	7
Колонок / <i>Mustela sibirica</i>	1,4	0	12,8	25,6*	3,9
Степной хорь / <i>Mustela eversmannii</i>	0	0	0	0	1,95
Соболь / <i>Martes zibellina</i>	0	0	0	0	21,6
Обыкновенная лисица / <i>Vulpes vulpes</i>	12,7	3,3	11,6	15,6	1,45
Заяц-беляк / <i>Lepus timidus</i>	33,7	19,3	25,3	25,8	110,2
Сибирская косуля / <i>Capreolus pygargus</i>	0	5,1	0	9,3	1,21
Европейский лось / <i>Alces alces</i>	0	0	0	0	14,3

Примечание: * Наибольшая плотность вида.
Note: * Maximum density of species.

eversmannii Lesson, 1827; европейский лось *Alces alces* (Linnaeus, 1758).

На каждой из рекультивированных площадок, как и в случае с мелкими млекопитающими, выявлялась только часть видов крупных зверей, относительно контрольных участков. Анализ сопряжённости выявленной численности видов на рекультивированных территориях и ближайшей точке контроля (площадка 6) позволяет предположить наличие логичной взаимосвязи по типу хищник-жертва между лисицей и грызунами ($R = 0,94$; $p = 0,051$), а также с зайцем ($R = 0,80$; $p = 0,20$). Между куньими и грызунами данная зависимость просматривается хуже ($R = 0,63$) и не значима при ограниченном наборе одновременно сравниваемых площадок.

На каждой из исследованных площадок сложился свой набор защитных и кормовых условий для исследуемых видов млекопитающих. Мозаичные посадки облепихи крупновидной (площадка 3) создают хорошие защитные условия для зайца-беляка и привлекают сюда обыкновенную лисицу. Разбор следов показал, что плотное переплетение кустов способствует укрытию зайца, а преследование его лисицей сквозь густой кустарник затрудняет. Также на этом участке изредка встречается колонок.

Опушки мёртвопокровных сосняков (площадка 1) создают благоприятные условия для зайца-беляка, численность которого здесь оказалась на треть выше, чем на примыкающих нетронутых контрольных участках черневой тайги (площадка 6), при этом в глубину леса

заяц почти не заходит. Численность лисицы здесь также достаточно высока. Косуля не обнаружена, что связано с дефицитом кормовой базы. Перегущенные сосновые насаждения не позволяют развиваться травянистому и кустарниковому ярусам [15] и в конечном итоге оказываются наименее предпочтительными биотопами для травоядных зверей.

Отвалы, самозарастающие берёзой (площадка 2), в целом оказались не слишком благоприятными для крупных животных. Здесь были отмечены заяц-беляк, лисица и сибирская косуля, но численность этих видов ниже, чем на таёжных участках. Наибольшая концентрация следов косули и зайца отмечается на участках с высокой мозаичностью и вдоль опушечной линии, где развитый кустарниковый подрост создаёт кормовую базу.

Таким образом, все рекультивированные участки не обеспечивают условий для поддержания как видового разнообразия, так и плотности большинства видов зверей, характерных для черневой тайги. Сложившиеся на них условия сформировали обеднённые и специфичные сообщества млекопитающих, функционирование которых ограничено сложившимися растительными ассоциациями и характером почвенного горизонта.

Заключение

Проведённые исследования показывают, что ни один из рекультивированных участков не создаёт полноценных условий для сообщества млекопитающих – обитателей тайги даже

спустя 30–40 лет после проведения рекультивации. Наиболее показательны в этом плане сообщества мелких млекопитающих рекультивированных территорий, которые существенно обеднены по сравнению с коренными таёжными. В целом сосновые разреженные насаждения для мелких млекопитающих оказались более привлекательны, нежели лиственные леса или сомкнутые мёртвопокровные сосновые боры. Формирующиеся здесь сообщества мелких млекопитающих характеризуются наибольшим сходством с коренными и приближаются к ним по показателям абсолютной численности.

Помимо состава древостоя, для мелких млекопитающих важным фактором является толщина почвенного слоя. Территории с незначительным нанесением плодородного слоя характеризуются наименьшим биологическим разнообразием этой группы, поэтому при рекультивации должен обязательно наноситься почвенный слой и глинистая фракция толщиной не менее 0,5–1 м. Это создаст благоприятные условия не только для растений, но и целой группы млекопитающих и беспозвоночных, тесно связанных с почвенным слоем. Наибольшее предпочтение у более крупных млекопитающих (заяц-беляк, лисица, косуля сибирская) вызвали территории с высокой степенью мозаичности и развитым кустарниковым ярусом.

Общепринятая практика использования монокультур приводит к формированию крайне обеднённых сообществ животных, которые не могут там найти ни пропитания, ни укрытия. Даже в случаях невозможности проведения экологической реставрации необходимо проводить комплексную рекультивацию, применять мозаичную посадку биогруппами с чередованием хвойных, смешанных и лиственных площадок и большим количеством различных кустарников.

Так как животные концентрируются на экотонных участках, необходимо предусмотреть формирование протяжённой опушечной линии, то есть закладывать «лесные поляны», окружённые деревьями и плотным кольцом кустарников, что позволит свести к минимуму фактор беспокойства.

Сохранение таёжных массивов, примыкающих к рекультивируемым территориям, создаёт благоприятные возможности для естественного расселения видов коренной фауны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-44-420008.

References

1. Strel'nikova T.O., Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Kupriyanov O.A. Impact of coal mining on the diversity and ecological structure of the vegetation cover of the low mountains of the Kuznetsk Alatau // *Botanicheskie issledovaniya Sibiri i Kazahstana*. 2016. No. 22. P. 90–99 (in Russian).
2. Kondakova L.V., Dabakh E.V., Kislitsina A.P. Biocenosis formation on technogenic wastes // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 129–135 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-129-135
3. Brenner F.J., Kelly R.B., Kelly J. Mammalian community characteristics on surface mine lands in Pennsylvania // *Environmental Management*. 1982. V. 6. P. 241–249. doi: 10.1007/BF01866887
4. McGowan K.J., Bookhout T.A. Small mammal populations on Ohio strip-mined lands reclaimed with herbaceous vegetation under old and new reclamation laws // *The Ohio Journal of Science*. 1986. V. 86. P. 29–32.
5. Burger J.A. Sustainable mined land reclamation in the eastern U. S. coalfields: a case for an ecosystem reclamation approach // *Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation*. 2011. V. 28. P. 113–141. doi: 10.21000/JASMR11010113
6. Buehler D.A., Percy K. Coal mining and wildlife in the Eastern United States: a literature review. Final report to the appalachian Wildlife Habitat Foundation. University of Tennessee, Knoxville TN, 2012. 38 p.
7. Attuquayefio D.K., Owusu E.H., Ofori B.Y. Impact of mining and forest regeneration on small mammal biodiversity in the Western Region of Ghana // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. V. 189. Article No. 237. doi: 10.1007/s10661-017-5960-0
8. Pyashenko V.B., Luchnikova E.M., Skalon N.S., Grebentschikov I.S., Kovalevsky A.V. Long-term dynamics of small-mammal communities in anthropogenically disturbed territories in the south-east of West Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. No. 224. Article No. 012055. doi: 10.1088/1755-1315/224/1/012055
9. Lawer E.A., Mupepele A.C., Klein A.M. Responses of small mammals to land restoration after mining // *Landscape Ecology*. 2019. V. 34. P. 473–485. doi: 10.1007/s10980-019-00785-z
10. Pyashenko V., Luchnikova E., Kovalevskiy A., Zubko K. Database state registration certificate No. 2021620036 Small mammal population monitoring at the “Azhendarovo” Biological Station from 1978 to 2019 (Kemerovo Region, Russia). No. 2020622761. Date of admission 21.12.2020. Date of state registration in the database registry 12.01.2021. doi: 10.13140/RG.2.2.20287.74402
11. Onishchenko S.S., Il'yashenko V.B., Luchnikova E.M., Teplova N.S., Bibik E.V., Skalon N.V. A practical guide to studying small mammals. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2010. 99 p. (in Russian).

12. Kuzyakin V.A. Accounting for the number of hunting animals. Moskva: KMK Scientific Press Ltd., 2017. 320 p. (in Russian).

13. Luchnikova E., Ilyashenko V., Teplova N., Kovalevsky A., Zubko K. Impact of agrocenoses on the populations of small mammals of recreational pine forests in the Tom River valley // E3S Web of Conferences. XIII International scientific and practical Conference "State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020". 2020. V. 175. Article No. 14002. doi: 10.1051/e3sconf/202017514002

14. Ravkin Yu.S., Bogomolova I.N., Tsybulin S.M., Panov V.V., Vartapetov L.G., Chesnokova S.V., Oni-

shchenko S.S., Ilyashenko V.B., Babina S.G. Spatial and typological inhomogeneity of small mammal communities in plains and mountains of West Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2009. V. 2. No. 3. P. 275–283. doi: 10.1134/S1995425509030187

15. Kovalevskiy A.V., Tarasova I.V., Luchnikova E.M., Filippova A.V., Voronina L.A., Gashkov S.I., Ilyashenko V.B., Zubko K.S., Smetanin A.V., Efimov D.A. Environmental direction of reclamation of disturbed lands of the Kuznetsk coal basin (Kuzbass) // Modern Biotechnology: Current Issues, Innovations and Achievements: Sbornik tezisov Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem onlayn-konferencii. Kemerovo, 2020. P. 204–206 (in Russian).

Фиторазнообразие как индикатор восстановления формации *Pinus sylvestris* L. Усманского бора после лесного пожара

© 2022. А. Я. Григорьевская, д. г. н., профессор,
Ю. С. Горбунова, к. б. н., доцент,
Т. А. Девятова, д. б. н., профессор, зав. кафедрой,
Воронежский государственный университет,
394036, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1,
e-mail: gorbunova.vsu@mail.ru

Проведён анализ динамики фиторазнообразия за 10 лет формации *Pinus sylvestris* L. в Усманском бору Воронежской области на территории России. Используются формализованные методы обработки массива данных при описании 140 учётных площадок в 1 м² на двух пробных площадях в фоновой и пирогенной формациях *P. sylvestris*. Учёт обилия выполнен по О. Друде. Пирогенный фактор, наряду с температурным режимом, освещённостью, увлажнением и эдафическими условиями оказывает сильное воздействие на фиторазнообразие лесных экосистем. Установлено четыре фазы сукцессии пирогенных фитоценозов с определением временных интервалов между ними. Первая фаза 2010 г. – пионерная группировка, отмечены случайные виды растений, между собой разобщены; вторая фаза 2011–2014 гг. – преобразование пионерной группировки, идёт внедрение растений, их размножение, появляются консортивные отношения между организмами, зафиксировано сорно-рудеральное мелкопестничково-сосновое сообщество (*Pinus sylvestris* – *Erigeron canadensis*); третья 2015–2018 гг. – начальная фаза разнотравно-кустарниковая, происходит перестройка структуры растительного сообщества, что выразилось в замене доминантов ярусов фитоценоза; четвёртая фаза начинается с 2019 г. – формирование лесной фитоценотической группы связано с затемнением и, как следствие, изменением температуры. Дана характеристика антропопотолерантных групп. В соотношении видов на фоновом и пирогенном участке к общему количеству прослеживается пополнение видового разнообразия на пирогенных участках. Полученные значения коэффициента регрессии для антропопотолерантных групп подчёркивают чувствительность флоры к пирогенному воздействию, особенно синантропофитов и гемиапофитов.

Ключевые слова: формация, флора, пирогенный фактор, фазы сукцессии, Усманский бор, *Pinus sylvestris* L.

Phyto-diversity as an indicator of the restoration of the *Pinus sylvestris* L. formation of the Usman forest after a forest fire

© 2022. A. Ya. Grigoryevskaya ORCID: 0000-0002-4342-9566,
Yu. S. Gorbunova ORCID: 0000-0003-1203-9087, T. A. Deviatova ORCID: 0000-0002-8722-1126,
Voronezh State University,
1, Universitetskaya Square, Voronezh, Russia, 394036,
e-mail: gorbunova.vsu@mail.ru

The analysis of the dynamics of phyto-diversity over 10 years of the *Pinus sylvestris* L. formation in the Usman forest of the Voronezh region on the territory of Russia is carried out. We used formalized methods for processing the data array when describing 140 accounting sites of 1 m² on two test sites in the background and pyrogenic formations of *P. sylvestris*. Accounting for abundance was conducted according to O. Drude. The pyrogenic factor, along with temperature, light, humidification, and edaphic conditions, has a strong effect on the phyto-diversity of forest ecosystems. Four phases of succession of pyrogenic phytocenoses with determination of time intervals between them have been established. The first phase of 2010 is a pioneer group, random plant species are noted, separated among themselves; second phase 2011–2014 – the pioneer group is being transformed, plants are being introduced, they are breeding, consort relations between organisms are appearing, a weed-ruderal erigeron-pine community (*Pinus sylvestris* – *Erigeron canadensis*) has been recorded; third 2015–2018 – the initial phase is herb-shrub, there is a restructuring of the structure of the plant community, which is expressed in the replacement of the dominants of the phytocenosis tiers; the fourth phase begins in 2019 – the formation of the forest phytocenotic group is associated with dimming and, as a result, a change in temperature. The characteristic of anthropotolerant groups is given. In the ratio of species in the background and pyrogenic areas to the total number, the replenishment of species diversity in pyrogenic areas is observed. The obtained values of the regression coefficient for anthropotolerant groups emphasize the sensitivity of the flora to the pyrogenic effects of especially synanthropophytes and hemiapophytes.

Keywords: formation, flora, pyrogenic factor, phases of succession, Usmansky pine forest, *Pinus sylvestris* L.

Пирогенный фактор наряду с температурным режимом, освещённостью, увлажнением и эдафическими условиями оказывает сильное воздействие на фиторазнообразие лесных экосистем. Пожары, повторяющиеся неоднократно на определённой территории, в современном природопользовании оцениваются как экзогенный локально-катастрофический фактор, ведущий к трансформации природных экосистем.

Сохранение и рациональное использование постпирогенных лесов в целом является одной из важнейших природоохранных и экономических задач. Эффективность её решения зависит от степени изученности лесных экосистем. Видовой состав флоры Усманского бора достаточно богат, поэтому его изучение осложняется огромной внутривидовой изменчивостью, формирующейся в условиях обширных экологически гетерогенных ареалов лесобразующих видов, что существенно повышает уровень биоразнообразия лесных экосистем [1]. Важно изучать состояние фиторазнообразия пирогенной формации *Pinus sylvestris* L. в динамике и постоянно вести сравнение с фоновым аналогом. Лесостепь в глобальном масштабе является одним из наиболее гетерогенных биомов [2, 3]. Равнинные лесостепные ландшафты Европейской России выделяются высоким фиторазнообразием.

Цель исследования – проанализировать динамику фиторазнообразия пирогенной формации *P. sylvestris* за десятилетний период в сравнении с фоновым аналогом.

Объекты и методы исследования

Пирогенное воздействие летом 2010 г. на естественные растительные сообщества принесло ощутимый экологический ущерб формации *P. sylvestris* (51°48'37,4" с. ш., 39°23'42,6" в. д. и 51°48'37,6" с. ш., 39°23'42,6" в. д.). Работы на этой территории с оценкой негативного воздействия велись ежегодно с 2012 г. Результаты исследований за 2012, 2014–2016 гг. опубликованы в работах [4–6]. Подробный анализ экобиоморфологической структуры флоры представлен в [4]. Исследования влияния пожаров на растительный покров леса в регионе проводятся эпизодически. В частности, рассмотрено влияние пожара на состояние редких видов растений в урочище Морозова гора [7]. Данные о влиянии пожаров на весь природный комплекс, пройденный огнём, отсутствуют.

Исследуемая территория относится к району левобережных песчаных террас рек Дона, Воронежца и Битюга. Коренные породы перекрыты флювиогляциальными и древнеаллювиальными отложениями. Рельеф представлен полого-волнистой равниной, сформированной в древнем голоцене. Согласно геоботаническому районированию, бор относится к Усманскому району зеленомошных сосновых и осоковых дубовых лесов Боброво-Усманского округа Среднерусской дубово-сосновой провинции. Основными почвообразующими породами являются древнеаллювиальные отложения. Почвы представлены дерново-элювозёмными глееватыми и глеевыми глинисто-иллювиальными [4].

Методика выявления видового состава флоры на фоновой и пирогенной территориях формации *P. sylvestris* включала ежегодные описания флоры двух постоянных пробных площадей размером 20 м × 20 м, внутри которых велись работы на 10 учётных площадках размером 1 м × 1 м. Всего было описано 140 учётных площадок за период 2012–2019 гг.

Ярусную структуру устанавливали по высоте деревьев, а название растительных сообществ определяли доминантным признаком. Учёт обилия проведён по О. Друде [8]. Проективное покрытие (ПП) древесных пород учитывали по степени сомкнутости крон. Проекция растений к заданной площади участка (обычно 1 м²) составляла его ПП. Общее проективное покрытие (ОПП) для растительного сообщества получено путём сложения ПП каждого вида с определением средней величины.

Результаты и обсуждение

Развитие пожара зависит от рельефа местности, типа и состояния растительности, силы и направления ветра, массы накопленного сухого горючего материала (лесной подстилки). При высушенном естественном травостое и безветрии пожары распространяются со скоростью 15–18 м/мин. [9]. В случае нахождения в естественной среде скоплений горючих материалов (стога соломы, сена, штабелей древесины, а также при техногенном загрязнении естественной среды вследствие разлива нефти или продуктов её переработки) длительность огневого воздействия и его температура возрастают в несколько раз или даже на порядки. Огонь воздействует на растения непосредственно, повреждая или уничтожая их, и косвенно – изменяя структуру, флору-

стический состав фитоценоза и экологические условия экотопа.

Сосновые леса очень пожароопасны ввиду сухости местности, ажурности строения полога леса и невысокой влажности подстилки. В хвойных лесах частота возникновения пожаров связана в первую очередь с малой влажностью хвои, которая в засушливый период июля и августа 2010 г. достигла максимальных показателей.

Огонь в лесу выполняет двойную функцию, он является и разрушителем, и созидателем. Уничтожая моховой и травяной покров, выжигая подстилку и гумус, согласно нашим исследованиям, опубликованным в 2014 г. [4–6], огонь создаёт благоприятные условия для прорастания семян ряда растений, появления и формирования самосева сосны, берёзы и некоторых других древесных пород. В то же время, уничтожая подрост деревьев, пожар нередко способствует появлению не характерных для леса видов растений, развитию водной и ветровой эрозии. Установлено, что чрезмерный выпас и пирогенный фактор сдерживают прогрессивные сукцессии растительного покрова [10]. Лесные пожары влияют на видовой состав древостоя, нарушают и изменяют возрастную структуру леса. Так, после лесного пожара в 2012 г. нами выявлено, что в Усманском бору изучаемая формация *P. sylvestris* имеет 35 видов сосудистых растений из 30 родов 23 семейств 2-х отделов *Pinophyta* и *Magnoliophyta*. Такие показатели пирогенных фитоценозов, как малая видовая насыщенность семейства – 1,5 вида, рода – 1,2 вида, видовое обилие *sp.* (редко), *sol.* (единично), ОПП до 50% констатируют высокую степень её нарушенности [4].

Принимая во внимание динамику климата и пирогенное воздействие, которому была подвержена исследованная нами территория в 2010 г., произошла трансформация флоры Усманского бора. На первый план мы выносим вопрос распространения видов, нами учитывается обилие видов в динамике, начиная с 2012 г., их распространение на гарях, на постпирогенных территориях, а также аспекты сохранения редких и исчезающих видов растений.

Состав антропоотолерантных групп показывает степень трансформации изучаемой лесной формации. Синантропный компонент флоры включал в себя 8 видов в 2015 г., 6 – в 2016 г., 16 – в 2018 г., 25 видов – в 2019 г. Высокая доля синантропных видов подчёркивает антропогенную нарушенность территории. Синантропный компонент флоры делится

на аборигенный апофитный и адвентивный. Среди апофитов выделяют эвапофитов, гемиапофитов и случайных (неустойчивых) апофитов. Эвапофиты (облигатные апофиты) – на пирогенном участке не встречались, но были отмечены нами ранее на фоновых территориях. Гемиапофиты (факультативные апофиты) – 4 вида (23,5%) в 2015 г., 2 вида (14,3%) – в 2016 г., 9 видов (34,6%) – в 2018 г. и 11 видов (29,7%) – в 2019 г. Случайные (неустойчивые) апофиты – 3 вида (21,4%) в 2015 г., 2 вида (15,4%) – в 2016 г., 7 видов (26,9%) – в 2018 г. и 13 видов (35,1%) – в 2019 г. Адвентивный элемент флоры был представлен одним кенофитом в 2015 г. *Erigeron canadensis* L. и одним археофитом *Polygonum aviculare* L.

Индигенные виды насчитывали 9 в 2015 г., 8 – в 2016 г., 10 – в 2018 г. и 12 видов – в 2019 г. Встречались следующие виды: *Veronica incana* L., *Convallaria majalis* L., *Melampyrum pratense* L., *Polygonatum multiflorum* (L.) All., *Betonica officinalis* L. и др.

Проведённый анализ динамики флоры постпирогенной формации *P. sylvestris* показывает её изменение за последние годы. Так, в соотношениях видов на фоновом и пирогенном участках к общему количеству видов прослеживается пополнение видовой разнообразия на пирогенных участках.

В 2012 г. зафиксировано 20 видов на фоновом участке и только 6 – на пирогенном (рис. 1). В 2015 г. отмечено 40 видов на фоновом участке и только 17 – на пирогенном. В 2016 г. зафиксирован 41 вид: на фоновом участке – 35, на пирогенном – 14 видов. В 2018 г. на пирогенном участке росли: *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth., *Vincetoxicum hirundinaria* Medik., *Centaurea marschalliana* L., *Pulsatilla patens* L., *Galium boreale* L. и др. В 2018 г. описано 30 видов, среди которых 28 – на фоновом участке и 26 – на пирогенном. *Polygonatum multiflorum* (L.) All. и *Geranium robertianum* L. росли только на пирогенном участке. В 2019 г. в формации *P. sylvestris* уже найдено 52 вида, из них 37 – на пирогенном участке. Заметно увеличилось число видов на пирогенном участке по отношению к предыдущим годам. На рисунках 1 и 2 видна контрастность в распределении флоры на фоновых и пирогенных участках в 2019 г. по сравнению с 2012 г. На рисунке 2 данные по эвапофитам и агриофитам отсутствуют, так как в 2019 г. они не были обнаружены ни на фоновом, ни на пирогенном участке, что свидетельствует о постепенном восстановлении флоры после антропогенного воздействия. Полученные диаграммы

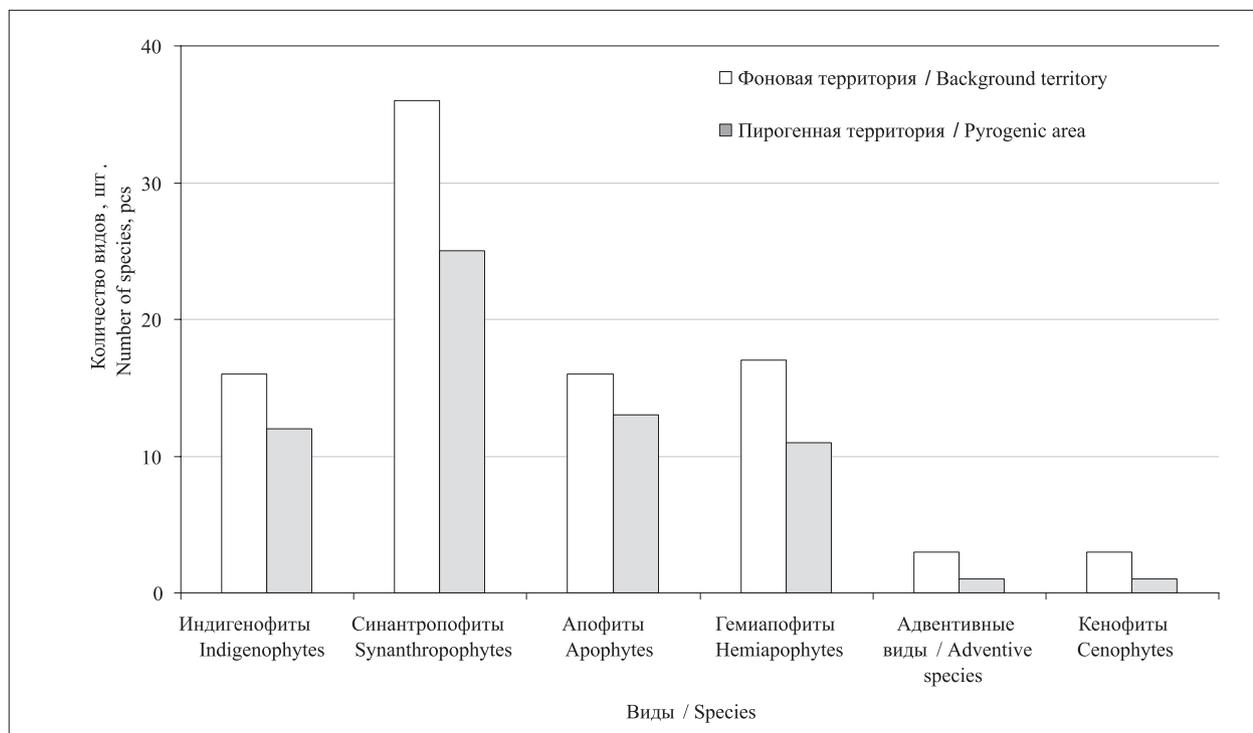


Рис. 1. Распределение антропоустойчивых групп в фоновой и пирогенной формациях *Pinus sylvestris* за 2012 г.
Fig. 1. The distribution of anthropotolerant groups in the background and pyrogenic formation of *Pinus sylvestris* for 2012

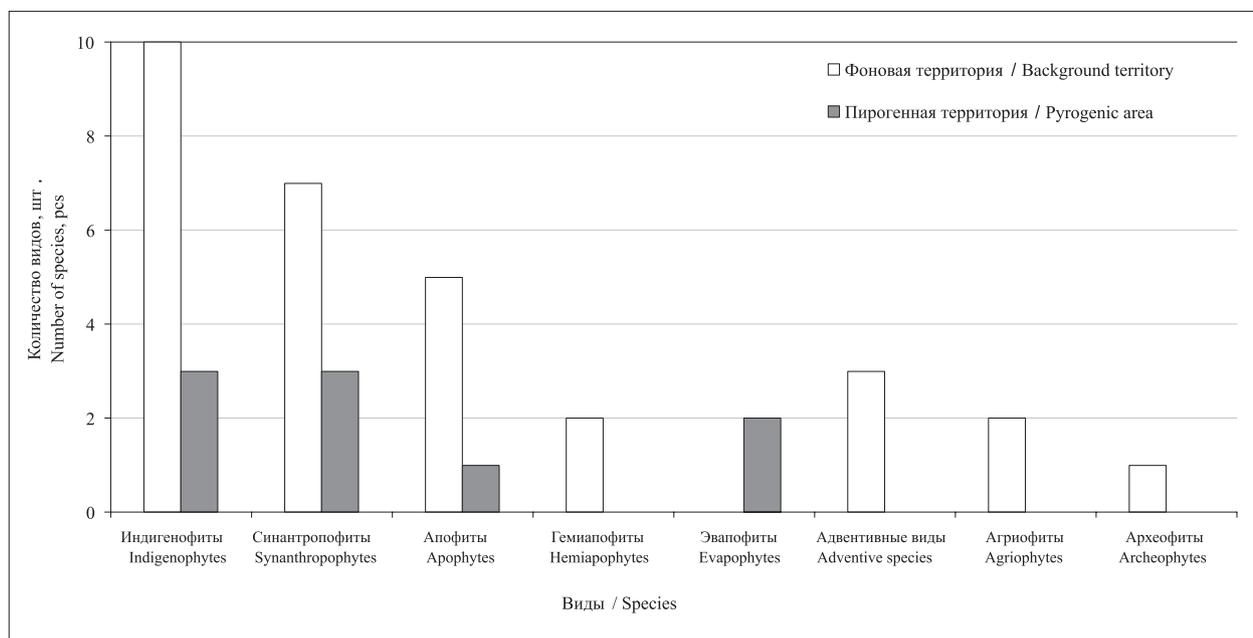


Рис. 2. Распределение антропоустойчивых групп в фоновой и пирогенной формациях *Pinus sylvestris* за 2019 г.
Fig. 2. The distribution of anthropotolerant groups in the background and pyrogenic *Pinus sylvestris* formation for 2019

для антропоустойчивых групп наглядно демонстрируют чувствительность флоры к пирогенному воздействию, особенно синантропофитов и гемиапофитов. Количество видов на пирогенной и фоновой территориях

в 2019 г. распределено по антропоустойчивым группам более равномерно по сравнению с 2012 г., что подтверждает восстановление флоры после лесного пожара 2010 г. (рис. 2).

Наблюдения за динамикой флоры в течение 10-ти летнего периода и результаты анализа дали возможность установить формирование сукцессионных смен фитоценоза и временные интервалы смены сукцессий.

Первая стадия – 2010 г. Фитоценоз пирогенной формации находился в стадии пионерной группировки, со случайным набором растений и их разобщённостью.

Вторая стадия – 2011–2014 гг. Происходило преобразование пионерной группировки, внедрение растений, их размножение, появлялись консортивные отношения между организмами. Появилось сорно-рудеральное мелколепестниково-сосновое сообщество (*Pinus sylvestris* – *Erigeron canadensis*). Первый ярус был образован *P. sylvestris* с ПП до 25%. Подрост и подлесок отсутствовали. Инвазионный монокарпик *Erigeron canadensis* имел ПП до 50%, являлся доминантом и находился во втором ярусе. Редко встречались *Chelidonium majus*, *Chamaenerion angustifolium*, *Calamagrostis epigeios*, а из лесной фитоценотической группы – *Polygonatum odoratum*, *Convallaria majalis*. Общее проективное покрытие ассоциации *Pinus sylvestris* – *Erigeron canadensis* составляло 75%. Описание пирогенного растительного сообщества *Pinus sylvestris* – *Rumex acetosa* – *Erigeron canadensis* формации *P. sylvestris* в 2014 г. констатировало смену доминантов. Доминант первого яруса *P. sylvestris* – 25%, второго – *Rumex acetosa* – 12–15%, третьего – *Erigeron canadensis* – 8–10%, ОПП составляло 55%. В разреженном подлеске высотой до 4 м появились *Sorbus aucuparia* – 1,5%, *Chamaecytisus ruthenicus* – 1,2%. Сформировалась группа поликарпиков из злаков: *Calamagrostis epigeios* – 1,2%, *C. arundinacea* – 2%, *Poa angustifolia* – 1,5%, *P. annua* – 1,5%, *Festuca sulcata* – 1,2%, *Dactylis glomerata* – 1,4%, *Agrostis canina* – 1,5%. Одиночные особи *Pulsatilla patens* – 2% (вид Красной книги Воронежской области) росли по всему участку. Формировалась лесная фитоценотическая группа с участием *Polygonatum odoratum* – 1% и *P. multiflorum* – 1%, и опушечно-лесная – *Veronica incana* – 1%, *Verbascum nigrum* – 1%, *Campanula rotundifolia* – 1%. Лесной пожар не уничтожил корневую систему растений, но сильно её нарушил. Спустя 4 года после пожара стали восстанавливаться некоторые лесные растения, но сорных видов было достаточно много. Такое начальное усложнение структуры лесного фитоценоза пирогенной формации за счёт корневого возобновления

поликарпиков с учётом семенного запаса в почве можно считать подготовительным периодом восстановления лесной экосистемы. Таким образом, четырёхлетний период способствовал переходу первой сукцессионной фазы во вторую – сорно-рудеральную.

Третья стадия. С 2015 по 2017 гг. шло формирование разнотравья. Результаты описания ассоциации *Pinus sylvestris* – *Calamagrostis arundinacea* формации *Pinus sylvestris* за 2015–2017 гг. подтвердили продолжение динамики флоры и перестройку структуры растительного сообщества, что выразилось в замене доминантов ярусов фитоценоза, увеличении видового разнообразия. В пирогенном *Pinus sylvestris* – *Calamagrostis arundinacea* фитоценозе первый ярус занимала *P. sylvestris* – 30%. Доминант второго яруса *C. arundinacea* – 15%, ОПП составляло 72% в 2015 г. и 75% – в 2016 г. Сорные виды растений присутствовали, но находились в угнетённом состоянии. Увеличилось число видов лесной фитоценотической группы, среди которых отмечены *Carex digitata*, *Betonica officinalis*, *Fragaria vesca*, *Stellaria media*, *S. graminea*, *Melica nutans*, *Melampyrum nemorosum*, *Polygonatum officinale*, *P. multiflorum*, *Peucedanum oreoselinum*. Наблюдалось присутствие адвентивных и сорных растений: *Chenopodium album*, *Acer negundo*, *Erigeron canadensis*. Они не являлись доминантами и местами встречались редко, ОПП составляло 55%. В 2016 г. на пирогенной территории появился *Vincetoxicum hirundinaria* Medik. с обилием sol. В 2019 г. данный вид присутствовал как на фоновой, так и на пирогенной территории в обилие (sp./sp.) и (sol./sp.) соответственно.

Четвёртая стадия – 2018–2019 гг. Отмечено начало формирования лесной фитоценотической группы. В связи с затемнением и, как следствие, изменением температуры, появляются следующие виды в 2018 г. и присутствуют в 2019 г. *Melampyrum pratense* L. как на фоновой (сор.₂/сор.₃), так и на пирогенной территории (сор.₂/сор.₂) формации *P. sylvestris*. *Convallaria majalis* L. появился на фоновой территории в 2012, 2014 гг. в формации *P. sylvestris* (sp./sol.), а с 2015 г. и на пирогенной территории, где его обилие постепенно возрастало и достигло (сор.₂). В 2018 и 2019 гг. отмечали присутствие *Convallaria majalis* L. как на фоновой (сор.₂/сор.₂), так и на пирогенной территории (сор.₁/сор.₂) формации *P. sylvestris*. Начиная с 2018–2019 гг. происходит увеличение в фитоценотической группе такого опушечно-лесного вида как *Populus tremula* L. с обилием sp. как на

Заключение

фоновой, так и на пирогенной территории. В 2018 г. на пирогенном участке обнаружена *Polygonatum multiflorum* (L.) All. с обилием un, а в 2019 г. – и на фоновой территории (un./un.). *Origanum vulgare* L. – опушечно-лесной вид, наблюдаемый нами с 2018 г. как на фоновой, так и на пирогенной территории с обилием (sp./sp.), в 2019 г. – (sp./un.) соответственно. *Torilis japonica* (Houtt.) DC. – сорно-лесной вид, произрастающий на фоновой и пирогенной территории с обилием (сор.₁/sp.) в 2018 г., а в 2019 г. – (sp./sp.) соответственно. *Quercus robur* L. – лесной вид, встречающийся в 2018 г. как на фоновой, так и на пирогенной территории в обилие (sp./sp.), а в 2019 г. в обилие (sol./sol.) соответственно. *Betonica officinalis* L. – опушечно-лесной вид фитоценотической группы, который на фоновой территории отмечался нами ежегодно, а на пирогенной появился лишь в 2018 г. с обилием сор.₁, а в 2019 г. – sp. соответственно. *Campanula persicifolia* L. опушечно-лесной вид, появившейся только на территории формации *P. sylvestris* в 2018 г. на фоновой территории (sol.), а в 2019 г. обнаружен и на пирогенной территории (sol./sol.). *Rhamnus cathartica* L. – опушечно-лесной вид, появившийся только в 2019 г. на фоновой и пирогенной территории формации *P. sylvestris* (sol./sol.). *Silene nutans* L. появилась после пирогенного воздействия на фоновой территории в 2012 г. в формации *P. sylvestris* (sol.), а на пирогенных участках только в 2019 г. (sol.). Так протекает четвёртая фаза сукцессии – лесная. Появление лесных элементов флоры говорит о том, что сохранившиеся корневые системы дали возобновление из почк. Степная группа не является доминантной, а степные растения находятся в угнетённом состоянии, так как появилось высокотравье, которое создало затенение и уменьшение светового альбеда.

Адвентивный элемент флоры представлен кенофитами и археофитами. Археофиты представлены одним видом в 2015 г. – *Polygonum aviculare* L. Кенофиты – 1 вид в 2015 г., 2 вида – в 2016, 2018 и в 2019 г., представлены такими видами как *Erigeron canadensis* L., *Centaurea biebersteinii* DC. и *Epilobium pseudorubescens* L.

Индигенная группа насчитывала 5 видов в 2015 г., 9 – в 2016 г., 6 – в 2018 г. и 8 видов – в 2019 г. Встречались следующие виды: *Pulsatilla patens* L., *Peucedanum alsaticum* L., *Convallaria majalis* L., *Rhamnus cathartica* L., *Sempervivum ruthenicum* Schnittsp. et C.B. Lehm. и др.

По результатам ежегодного наблюдения за динамикой флоры в фоновой и пирогенной формациях *Pinus sylvestris* выявлено влияние лесного пожара на флору Усманского бора. Отмечено изменение видового состава, доминантов, увеличение видового разнообразия с каждым годом формирования структуры лесной формации на пирогенной территории. Установлено четыре фазы сукцессии: первая фаза 2010 г. – пионерная группировка, со случайным набором растений и их разобщённостью; вторая фаза 2011–2014 гг. – преобразование пионерной группировки, внедрение растений, их размножение, появлялись консортивные отношения между организмами; третья фаза 2015–2017 гг. – начальная фаза разнотравно-кустарниковая, перестройка структуры растительного сообщества, что выразилось в замене доминантов ярусов фитоценоза, увеличении видового разнообразия; четвёртая фаза (начиная с 2018–2019 гг.) – формирование лесной фитоценотической группы, происходит за счёт появления видов, характерных для исследуемой территории до воздействия пирогенного фактора: *Acer tataricum*, *A. campestre*, *Quercus robur*, *Populus tremula*, *Polygonatum multiflorum*, *Origanum vulgare*, *Torilis japonica*, *Quercus robur*, *Betonica officinalis*, *Campanula persicifolia*, *Rhamnus cathartica*, *Silene nutans*, *Calamagrostis arundinacea*, *Melica nutans*, *Euonymus europaeus*, *E. verrucosa*, *Caragana arborescens*, *Aegopodium podagraria*, *Pulmonaria obscura*, *Convallaria majalis*, *Melampyrum nemorosum*, *Chelidonium majus*, *Viola odorata*. Таким образом, происходит восстановление пирогенной формации *P. sylvestris* за счёт появления лесных элементов флоры.

References

1. Klimov A.V., Proshkin B.V. The use of morpho-anatomical characters to identify hybrid plants in the natural hybridization zone of *Populus laurifolia* and *P. nigra* in Siberia, Russia // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2019. No. 46. P. 64–81 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/46/4
2. Wesche K., Ambarlı D., Kamp J., Török P., Treiber J., Dengler J. The Palaearctic steppe biome: A new synthesis // Biodiversity and Conservation. 2016. No. 25. P. 2197–2231. doi: 10.1007/s10531-016-1214-7
3. Erdős L., Ambarlı D., Anenkhonov O.A., Bátori Z., Cserhalmi D., Kiss M., Naqinezhad A. The edge of two worlds: A new review and synthesis on Eurasian forest-steppes // Applied Vegetation Science. 2018. V. 21. No. 3. P. 345–362. doi: 10.1111/avsc.12382

4. Devyatova T.A., Gorbunova Y.S., Grigor'evskaya A.Ya. Modern evolution of soils and flora of the forest-steppe of the Russian Plain after forest fires. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2014. 259 p. (in Russian).

5. Devyatova T.A., Gorbunova Y.S., Romyanceva I.V. Basic property analysis of sod-forest soil covered by a forest fire in the territory of Usmanskyy pinery (RF) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol (Velikobritaniya), 2019. P. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012048

6. Grigor'evskaya A.Ya., Devyatova T.A., Gorbunova Y.S., Sorokina N.A. Phytodiversity of pyrogenic formations of the usman forest (Voronezh Oblast) // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 4. P. 248–256. doi: 10.1134/S2079096119040036

7. Skol'zheva L.N., Nedosekina T.V. The effect of the 2010 fire on the state of rare plant species in the tract Morozova Mountain // Redkie vidy gribov, rasteniy i zhyvotnyh Lipeckoy oblasti: Informacionnyy sbornik materialov. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2011. 204 p. (in Russian).

8. Drude O. Okologie der Pflanzen. Die Wissenschaft Vieweg. Braunschweig, 1913. 308 p. (in German).

9. Il'ina V.N. Pyrogenic impact on vegetation cover // Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. 2011. V. 20. No. 2. P. 4–30 (in Russian).

10. Rybshlykova L.P. Dynamics of vegetation of phytomelior of focal deflation on the territory of the Republic of Kalmykia // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 152–158 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-152-158

Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства

© 2022. Л. В. Пилип¹, к. в. н., доцент,
Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с., В. А. Козвонин^{2,3}, к. м. н., с. н. с.,
Е. П. Колеватых³, к. м. н., доцент, зав. кафедрой,
Т. Я. Ашихмина^{2,4}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
А. В. Сазанов², к. б. н., доцент,

¹Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

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

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

Крупные промышленные свинокомплексы являются источником биологического загрязнения пахотных земель, расположенных вблизи данных предприятий, в результате внесения больших объёмов жидкой фракции навозных стоков. Утилизация указанных биогенных отходов является серьёзной экономической и экологической проблемой. Исследование посвящено изучению влияния жидкой фракции навозных стоков свиноферм на санитарное состояние пашни по данным агрохимического и микробиологического исследования образцов почвы. В ходе исследования выявлено, что регулярное внесение свиных навозных стоков в пашню (на протяжении 5 лет) привело к существенному повышению содержания подвижных форм фосфора и калия; отмечена выраженная тенденция к накоплению меди и цинка в пахотном горизонте почвы, а также зарегистрированы высокие значения общего микробного числа, индекса бактерий группы кишечной палочки, энтерококков и *Clostridium perfringens*. В значительных количествах обнаружены сальмонеллы, в том числе патогенные, и термофильные бактерии. Кроме того, свиные навозные стоки являются потенциальными источниками попадания в почву сельскохозяйственных угодий, а также сопряжённых территорий бактерий *E. coli*, *C. perfringens*, *Proteus* spp., *Clostridium* spp., *Salmonella enteritidis*, грибов *Alternaria alternate*, *Botrytis cinerea*, дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Недостаток внимания к экологическому мониторингу территорий, прилегающих к животноводческим предприятиям, может привести к химическому и биологическому загрязнению окружающей среды широким спектром поллютантов, присутствующих в навозных стоках, а интенсификация развития отрасли промышленного свиноводства ускорит данный процесс.

Ключевые слова: свиные навозные стоки, микроорганизмы, промышленное свиноводство, биологическое загрязнение почвы, тяжёлые металлы, утилизация свиного навоза.

Biological contamination of arable land with pig waste

© 2022. L. V. Pilip¹ ORCID: 0000-0001-9695-7146, N. V. Syrchina² ORCID: 0000-0001-8049-6760
V. A. Kozvonin^{2,3} ORCID: 0000-0002-2447-6949, E. P. Kolevatykh³ ORCID: 0000-0001-6147-3555
T. Ya. Ashikhmina^{2,4} ORCID: 0000-0003-4919-0047, A. V. Sazanov² ORCID: 0000-0002-6934-3330

¹Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Kirov State Medical University,
112, Karla 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: pilip_larisa@mail.ru, nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Large industrial pig farms are a source of biological contamination of arable lands located in the immediate vicinity of these enterprises, as a result of the introduction of large volumes of liquid fraction of manure effluents. Utilization of these biogenic wastes is a serious economic and environmental problem for the agro-industrial complex. The work is devoted to the study of the influence of the liquid fraction of pig farm manure effluents on the sanitary condition of arable land according to agrochemical and microbiological studies of soil samples. The study revealed that the regular introduction of pig manure into arable land (for 5 years) led to a significant increase in the content of mobile forms of phosphorus and potassium; there was a pronounced tendency to the accumulation of copper and zinc in the arable horizon of the soil, in addition, high values of the total microbial number, the index of bacteria of the group *Escherichia coli*, *Enterococci* and *Clostridium perfringens*. *Salmonella*, including pathogenic and thermophilic bacteria, were found in significant quantities. In addition, pig manure effluents are potential sources of ingress into the soil of agricultural land, as well as adjacent territories with saprophytic microorganisms, as well as bacteria of the group *E. coli*, *C. perfringens*, *Proteus* spp., *Clostridium* spp., *Salmonella enteritidis*, fungi *Alternaria alternate*, *Botrytis cinerea*, yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Insufficient attention to environmental monitoring of territories adjacent to livestock enterprises can lead to chemical and biological pollution of the environment by a wide range of pollutants present in manure runoff, and the intensification of the development of the industrial pig industry will accelerate this process.

Keywords: pig manure effluents, microorganisms, industrial pig farms, biological soil contamination, heavy metals, pig manure management.

Охрана окружающей среды и внедрение безотходных технологий производства входят в число приоритетных задач, решаемых промышленным свиноводством на современном этапе. Основными отходами данной отрасли являются навоз и навозные стоки (НС). По данным официальной статистики, поголовье свиней в Российской Федерации (РФ) на конец 2021 г. в хозяйствах всех категорий достигло 26192,9 тыс., при этом ежегодное количество образующихся НС приблизилось к 96 млн т. Переработка такой массы биогенных отходов представляет серьёзную экономическую и экологическую проблему. Оптимальным способом утилизации НС считается внесение их в почву в качестве органического удобрения [1, 2]. Однако свежий свиной навоз (СН) относится к отходам III класса опасности, использование которых для восстановления плодородия почв возможно только после соответствующего обеззараживания. Чаще всего необходимая степень обезвреживания достигается за счёт длительного выдерживания НС в специальных навозохранилищах.

Обезвреженные отходы транспортируются на поля и запахиваются. Поскольку транспортировка навоза на значительные расстояния сопряжена с большими расходами, данные органические удобрения чаще всего используются на сельскохозяйственных угодьях, расположенных вблизи животноводческих комплексов. Согласно Земельному кодексу РФ, пашня относится к категории земель сельскохозяйственных угодий, систематически обрабатываемых и используемых под посевы сельскохозяйственных культур, поэтому подлежит особой охране.

Для успешной реализации схемы утилизации НС вместимость навозохранилищ должна соответствовать количеству образующихся

отходов, а площадь сельскохозяйственных угодий, которыми располагает предприятие, должна быть достаточной для размещения всего объёма обезвреженных НС в соответствии с действующими нормативами. Вместе с тем результаты обследований свиноводческих предприятий показали, что вместимость навозохранилищ соответствует фактическому накоплению навоза только в 1 хозяйстве из 10, кроме того, многие предприятия имеют недостаточное количество площадей для полной утилизации НС [3]. Низкая культура управления отходами свиноводства приводит к тому, что вместе с НС в пашню поступает широкий спектр загрязняющих веществ и не свойственных природным почвам микроорганизмов (МО) [4–6]. Даже навоз, полученный от клинически здоровых свиней и хранящийся в лагунах (прудах-накопителях), становится потенциальным источником загрязнения почвы бактериями группы кишечной палочки [7]. В настоящее время, в связи с широким распространением зоонозных заболеваний, проблема переноса МО от свиней через НС в окружающую среду приобретает особую актуальность и практическую значимость [8–11].

Цель настоящего исследования состояла в изучении влияния жидкой фракции навозных стоков свиноферм на санитарное состояние пашни.

Объекты и методы исследования

Для оценки воздействия НС на санитарное состояние пашни было выбрано пахотное поле (ПП), расположенное вблизи крупного свинокомплекса Кировской области. На протяжении 5 лет в качестве органического удобрения в это поле вносили обезвреженные свиные НС. Технология и нормы внесения НС периодиче-

ски изменялись. В настоящее время жидкая фракция НС (ЖФС) откачивается из лагун и с помощью буксируемой шланговой системы вносится в ПП на глубину до 50 см. Объём внесения ЖФС осенью 2021 г. по данным хозяйствующего субъекта составил $208 \pm 16 \text{ м}^3/\text{га}$. Жидкую фракцию вносили после уборки кукурузы на зелёную массу.

Санитарное состояние пашни оценивалось по совокупности физико-химических и биологических показателей. Отбор образцов почвы проводили методом конверта с глубины 25–30 см в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 в сентябре-октябре 2021 г., через 20 дней после внесения ЖФС. Контрольные пробы отбирали на расстоянии около 400 м от внешней границы поля. Почва контрольного и экспериментального участков имела одинаковый механический состав – средний суглинок. Места отбора проб указаны на рисунке.

Химический анализ отобранных образцов почвы выполняли на базе Вятского государственного университета (табл. 1 и 2). Микробиологические и гельминтологические исследования проводили в Кировском государственном медицинском университете, они включали определение общего микробного числа (ОМЧ), являющегося показателем биологической активности почвы, установление титра и индекса бактерий группы кишечной палочки (БГКП), *Clostridium perfringens*, *Enterococcus* spp., наличие термофильных бактерий, сальмонелл, яиц гельминтов [12]. Сбор материала для микробиологических исследований осуществляли в стерильные ёмкости. Пробы доставляли в лабораторию в течение 1 суток с момента отбора. О количественном и качественном составе микробиоты судили по результатам культивирования. Для этого осуществляли ряд серийных десятикратных



Рис. Участки пробоотбора:

1 – экспериментальный участок,

2 – контрольный участок

Fig. Sampling points:

1 – experimental area, 2 – control area

разведений с последующим высевом материала на стандартные и специализированные питательные среды (модифицированный агаровый чашечный метод ОФС.1.7.2.0008.15), определением концентрации микробных клеток (КОЕ/г) и идентификацией МО с использованием биохимических тестов ERVALachema: АНАЭРОтест23, ЭНТЕРОтест 24N, СТАФИтест16, СТРЕПТОтест16, САНДИДАтест21.

Все экспериментальные исследования проводили в трёхкратной повторности с последующей обработкой результатов стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

Результаты и обсуждение

Оценку влияния НС на химические свойства почвы выполняли на основе данных о содержании в отобранных образцах основных элементов минерального питания растений (азота, фосфора, калия, серы), органического вещества, а также тяжёлых металлов (ТМ), входящих (медь, цинк) и не входящих (кадмий, свинец) в состав минеральных подкормок для животных.

В таблице 1 приведены результаты химического анализа отобранных образцов в сравнении со средневзвешенными агрохимическими показателями пахотных почв Кировской области (данные агрохимического обследования сельскохозяйственных угодий предоставлены ФГБУ ГЦАС «Кировский»).

Приведённые в таблице 1 данные свидетельствуют о том, что регулярное внесение НС привело к существенному повышению содержания подвижных форм фосфора и калия в почве. Содержание соответствующих элементов в агрозёме в настоящее время превышает уровень, необходимый для оптимального развития растений. Содержание фосфора и калия в контрольных образцах почвы, взятых на относительно небольшом расстоянии от ПП, также находится на высоком уровне, не характерном для дерново-подзолистых почв Кировской области [13].

В таблице 2 приведены данные о содержании ТМ в отобранных пробах, полученные атомно-абсорбционным методом с помощью спектрометра ААС «Спектр-5-4».

Согласно результатам химического анализа, содержание ТМ в образцах почвы не превышает установленные гигиенические нормативы ПДК (СанПин 1.2.3685-21). Вместе

Таблица 1 / Table 1

Химический состав отобранных образцов почвы / Agrochemical research of soil

Показатели Indicators	Метод анализа Analysis method	Опытные образцы Test samples	Контрольные образцы Control samples	Средневзвешенные агрохимические показатели пахотных почв Кировской области Weighted average agrochemical index of arable soils of the Kirov region
pH _{водн.} pH _{water}	ГОСТ 26423-85 GOST 26483-85	6,2±0,1	6,7±0,1	нет данных missing data
pH _{KCl}	ГОСТ 26483-85 GOST 26483-85	5,9±0,1	6,3±0,1	4,8
Азот (NO ₃ ⁻), мг/кг Nitrogen (NO ₃ ⁻), mg/kg	ГОСТ Р 53219-2008	3,0±0,9	1,3±0,4	нет данных missing data
Азот (NH ₄ ⁺), мг/кг Nitrogen (NH ₄ ⁺), mg/kg	GOST R 53219-2008	18±5	12,3±3,4	
Фосфор подвижный (P ₂ O ₅), мг/кг Mobile phosphorus (P ₂ O ₅), mg/kg	ГОСТ Р 54650-2011	1170±230	360±70	107
Калий подвижный (K ₂ O), мг/кг Mobile potassium (K ₂ O), mg/kg	GOST R 54650-2011	850±130	134±20	122
Сера подвижная, мг/кг Mobile sulfur, mg/kg	ГОСТ 26490-85 GOST 26490-85	10,4±0,8	6,0±0,5	5,9
Органическое вещество, % Organic matter, %	ГОСТ 26213-91 GOST 26213-91	5,3±0,8	1,60±0,31	2,1

Таблица 2 / Table 2

Содержание тяжёлых металлов в отобранных образцах почвы, мг/кг
The heavy metals content in selected soil samples, mg/kg

Показатели Indicators	Опытные образцы / Test samples		Контрольные образцы / Control samples	
	валовая форма gross form	подвижная форма movable form	валовая форма gross form	подвижная форма movable form
Zn	54±18	3,2±1,1	46±15	2,9±1,0
Cu	21±5	2,9±0,7	12,0±3,0	1,21±0,30
Cd	0,23±0,07	0,080±0,030	0,21±0,06	0,070±0,030
Pb	7,8±2,0	0,81±0,20	5,3±1,3	0,54±0,13

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные отличия (P > 0,95) между экспериментальными и контрольными образцами.

Note: bold type indicates significant differences (P > 0.95) between the experimental and control samples.

с тем, в пахотном горизонте ПП наблюдается накопление меди. Источником данного ТМ могут быть медьсодержащие минеральные добавки, включаемые в рацион животных. Кроме меди в состав минеральных добавок обычно входит цинк, однако этот элемент проявляет более высокую миграционную способность, что сдерживает его накопление в пахотном горизонте [14]. Содержание кадмия и свинца в экспериментальных образцах статистически значимо не отличается от содержания соответствующих элементов в контрольных образцах. Внесение необеззараженных НС и их

жидкой фракции в почву приводит к бактериальному загрязнению последней, при этом патогенные МО могут сохранять жизнеспособность длительное время (в течение 4–6 месяцев и более) после попадания в почву. Лабораторный контроль эффективности обеззараживания НС осуществляют по выживаемости индикаторных МО: кишечной палочки, энтерококков, стафилококков, аэробных спорообразующих бактерий [15].

Санитарно-бактериологические показатели исследуемых образцов почвы представлены в таблице 3.

Общая численность МО (табл. 3) в опытных образцах почвы была значительно выше нормативных значений и контрольных образцов. Одновременное обнаружение бактерий *E. coli* и *C. perfringens*, а также термофильных бактерий свидетельствует о свежем сильном загрязнении опытных образцов фекальными массами. Контрольные образцы почвы по показателям БГКП и *C. perfringens* отнесены к умеренно загрязнённым. Индекс энтерококков в 6 раз превышал значения контрольных образцов. Уровень загрязнения опытных проб сальмонеллами был в 116 раз выше, чем уровень загрязнения контрольных проб. Следует отметить, что сальмонеллы являются устойчивыми во внешней среде и патогенными МО для человека и животных.

Известно, что микробиоценоз почвы зависит от микробного состава СНС. В проведённых нами ранее исследованиях НС обнаружено 6 видов анаэробных и 7 видов факультативных аэробных МО, среди которых преобладали *Peptostreptococcus* sp. (*P. anaerobius*) и *Peptoniphilus* sp. (*P. asaccharolyticus*), присутствовали *Klebsiella* sp., *Enterococcus* sp., *Escherichia coli*, *Proteus* spp., *Bacteroides fragilis*, *Fusobacterium nucleatum*, *Clostridium* spp., *Staphylococcus epidermidis*, *Salmonella aureus*, *Alistipes putredinis* (*A. putredinis*), *Prevotella* spp. (*P. bivia*, *P. intermedia*), а также грибы *Candida* sp. [16–18]. Все эти МО в составе НС попадали в почву. Результаты микробиологического анализа отобранных образцов почвы приведены в таблице 4.

Согласно полученным результатам, микробное разнообразие контрольных образцов почвы оказалось более бедным. В результате

исследований удалось выявить 12 видов МО, среди которых доминировали грибы *Alternaria alternate* (89,9%) и *Botrytis cinerea* (0,79%), а также дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (8,99%). В контрольных образцах отсутствовали *Lactobacillus* spp., *Eubacterium* spp., *Proteus* spp., *Pseudomonas* spp., *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *Bacillus megaterium*, *Clostridium septicum*, а также *Actinomyces* spp., которые идентифицированы в экспериментальных образцах почвы. В значительно меньших количествах в контрольных образцах по сравнению с опытными были представлены *Pseudoramibacter* spp., *E. coli*, *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *Bifidobacterium* spp., *Clostridium putrificum*, *Alternaria alternate*, *Botrytis cinerea*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Salmonella enteritidis*. Количество МО контрольных образцов находилось в пределах низкой и средней степени микробной контаминации.

В опытных образцах почвы были представлены анаэробные и факультативно аэробные МО, дрожжи, плесневые грибы. Уровень контаминации соответствует высокой степени. В образцах почвы в значительных количествах присутствуют как представители нормальной микрофлоры желудочно-кишечного тракта свиней (*Lactobacillus* spp., *Bifidobacterium* spp., *Eubacterium* spp., *E. coli*, *Enterococcus* spp.), так и потенциальные возбудители болезней (*Salmonella enteritidis*). В опытных пробах преобладают *Alternaria alternate* (32,83%), *Saccharomyces cerevisiae* (28,14%), *Clostridium sporogenes* (32,83%). Наличие микробов родов *Bifidobacterium* и *Pseudoramibacter* свидетельствует о свежем биологическом загрязнении почвы.

Таблица 3 / Table 3

Санитарно-бактериологические показатели почвы
Sanitary and bacteriological indicators of soil

Показатели Index		Опытные образцы Test samples	Контрольные образцы Control samples
ОМЧ, КОЕ/г / Total microbial count, CFU/g		$(5,0 \pm 0,8) \cdot 10^8$	$(1,0 \pm 0,6) \cdot 10^4$
БГКП <i>Escherichia coli</i>	индекс, КОЕ/г / index, CFU/g	27	6
	титр / titer	10^{-3}	10^{-2}
Индекс энтерококков, КОЕ/г <i>Enterococcus</i> index, CFU/g		18	3
<i>Clostridium perfringens</i>	индекс, КОЕ/г / index, CFU/g	11	7
	титр / titer	10^{-5}	10^{-2}
Термофильные бактерии, КОЕ/г Thermophilic bacteria, CFU/g		$(8,0 \pm 0,2) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 1,6) \cdot 10^3$
Сальмонеллы, в том числе патогенные, КОЕ/г Salmonella, including pathogenic, CFU/g		$(7,0 \pm 1,8) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 1,9) \cdot 10$
Яйца гельминтов, экз./кг Helminth eggs, ind./kg		отсутствуют not found	

Таблица 4 / Table 4

Микробиоценоз почвы, КОЕ/мл / Microbiocenosis of soil, CFU/mL

Микроорганизмы Microorganisms		Опытные образцы Test samples	Контрольные образцы Control samples
<i>Bifidobacterium</i> spp.		$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 1,4) \cdot 10^3$
<i>Lactobacillus</i> spp.		$(6,0 \pm 1,2) \cdot 10^5$	отсутствуют not found
<i>Eubacterium</i> spp.		$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^7$	
<i>Proteus</i> spp.		$(6,0 \pm 1,2) \cdot 10^5$	
<i>Pseudomonas</i> spp.		$(7,0 \pm 1,2) \cdot 10^6$	
<i>Pseudoramibacter</i> spp.		$(7,0 \pm 1,3) \cdot 10^6$	
<i>Escherichia coli</i>		$(7,0 \pm 1,3) \cdot 10^6$	$(6,0 \pm 1,9) \cdot 10^3$
<i>Enterococcus</i>	<i>faecalis</i>	$(7,0 \pm 0,4) \cdot 10^5$	отсутствуют not found
	<i>faecium</i>	$(7,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$	
<i>Bacillus</i>	<i>cereus</i>	$(8,0 \pm 1,3) \cdot 10^5$	$(6,0 \pm 0,8) \cdot 10^2$
	<i>subtilis</i>	$(7,0 \pm 1,1) \cdot 10^6$	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^2$
	<i>megaterium</i>	$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^5$	отсутствуют not found
<i>Clostridium</i>	<i>sporogenes</i>	$(7,0 \pm 1,6) \cdot 10^8$	
	<i>putrificum</i>	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 1,3) \cdot 10^2$
	<i>bifermantans</i>	$(7,0 \pm 1,5) \cdot 10^5$	$(8,0 \pm 0,7) \cdot 10^3$
	<i>septicum</i>	$(6,0 \pm 1,4) \cdot 10^5$	отсутствует / not found
<i>perfringens</i>	$(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^5$	$(5,0 \pm 1,3) \cdot 10^2$	
<i>Salmonella enteritidis</i>		$(7,0 \pm 1,8) \cdot 10^3$	$(6,0 \pm 1,9) \cdot 10^1$
<i>Alternaria alternate</i>		$(7,0 \pm 1,4) \cdot 10^8$	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^6$
<i>Botrytia cinerea</i>		$(8,0 \pm 0,6) \cdot 10^6$	$(7,0 \pm 0,8) \cdot 10^4$
<i>Actinomyces</i>	spp.	$(8,0 \pm 1,1) \cdot 10^5$	отсутствуют not found
	<i>israelii</i>	$(6,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$	
	<i>naeslundii</i>	$(8,0 \pm 0,9) \cdot 10^6$	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		$(6,0 \pm 0,9) \cdot 10^8$	$(8,0 \pm 1,5) \cdot 10^5$

Как в опытных, так и в контрольных образцах почвы присутствовали плесневые грибы *Alternaria alternate* и *Botrytia cinerea*, а также патогенные бактерии рода *Salmonella* (*S. enteritidis*). Обнаружение в опытных и контрольных образцах одинаковых МО свидетельствует о том, что жидкие фракции НС способны загрязнять не только земли сельскохозяйственных угодий, но и смежные территории на значительные расстояния.

Заклучение

В результате выполненных исследований установлено, что продолжительное внесение больших объёмов НС в пашню, расположенную вблизи животноводческих предприятий, приводит к чрезмерному накоплению в пахотном горизонте подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O), а также повышению содержания меди и цинка, входящих в состав минеральных добавок и премиксов для животных. Высокий уровень подвижного фосфора и калия в почве свидетельствует о глубокой

трансформации естественных геохимических процессов под влиянием НС.

В микробиологическом профиле почвы, удобряемой навозными стоками, появляются МО, характерные для нативных НС, включая *Lactobacillus* spp., *Eubacterium* spp., *Proteus* spp., *Pseudomonas* spp., *Enterococcus faecalis*, *Enterococcus faecium*, *Bacillus megaterium*, *Clostridium sporogenes*, *Clostridium septicum*, *Actinomyces* spp. (*A. israelii*, *A. naeslundii*). Соответствующие МО не идентифицируются в незагрязнённых НС почвах. Количественное содержание МО, в том числе условно-патогенных, в опытных образцах значительно выше, чем в контрольных. Таким образом, внесение даже обезвреженной в лагунах жидкой фракции НС, приводит к изменению микробиоты земель сельскохозяйственных угодий, и представляет угрозу микробиологического загрязнения сопредельных территорий.

Интенсификация отрасли промышленного свиноводства диктует необходимость модернизации действующей системы обработки и утилизации образующихся отходов, а также осуществление регулярного мониторинга тер-

риторий, прилегающих к животноводческим предприятиям. Недостаток внимания к экологическому мониторингу может привести к серьёзным проблемам, связанным с химическим и биологическим загрязнением окружающей среды широким спектром поллютантов, присутствующих в НС.

References

1. Komyakova Ye.M., Antonova O.I. The composition of cattle and swine manure, features of use and prospects for recycling // Bulletin of Altai State Agrarian University. 2020. No. 6 (188). P. 63–68 (in Russian).
2. Terentev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Pilip L.V. Reducing the emission of odor-forming substances in the conditions of industrial pig breeding enterprises // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 113–120 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120
3. Intensive rearing of pigs: information and technical guide to best available technologies IRP 41-2107 [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/556173711> (Accessed: 04.06.2022).
4. Zhang D., Yuan X., Guo P., Suo Y., Wang X., Wang W., Cui Z. Microbial population dynamics and changes in main nutrients during the acidification process of pig manures // Journal of Environmental Sciences. 2011. No. 23. P. 497–505. doi: 10.1016/s1001-0742(10)60434-2
5. Duan G., Zhang H., Shen Y., Li G., Wang H., Cheng W. Mitigation of heavy metal accumulation in rice grain with silicon in animal manure fertilized field // Environmental Engineering and Management Journal. 2016. V. 15. No. 10. P. 2223–2229. doi: 10.30638/eemj.2016.241
6. Betancur O., Betancourt J., Estrada J., Henao F.J. Clinical significance of the persistence of pathogens in pig (*Sus scrofa*) manure used as biofertilizer and food // International Journal of Research in Agriculture and Forestry. 2017. V. 4. No. 9. P. 1–9.
7. Petkov G.S., Kostadinova G.S., Denev S.A., Mihaylova G.S., Pavlov D.C. Microbial pollution of soil around slurry storage lagoons at a pig-farm // Applied Soil Ecology. 2006. V. 34. No. 1. P. 10–18.
8. Cotta M.A., Whitehead T.R., Zeltwanger R.L. Isolation, characterization and comparison of bacteria from swine faeces and manure storage pits // Environmental Microbiology. 2003. V. 5. No. 9. P. 737–745. doi: 10.1046/j.1467-2920.2003.00467
9. Abu-Ashour J., Joy D.M., Lee H., Whiteley H.R., Zelin S. Transport of microorganisms through soil // Water, Air and Soil Pollution. 1994. No. 75. P. 141–158.
10. Głodowska M., Wozniak M. Changes in soil microbial activity and community composition as a result of selected agricultural practices // Agricultural Sciences. 2019. V. 10. No. 3. P. 330–351.
11. Usuia M., Kawakura M., Yoshizawa N., San L.L., Nakajima C., Suzuki Y., Tamura Y. Survival and prevalence of *Clostridium difficile* in manure compost derived from pigs // Anaerobe. 2017. V. 43. P. 15–20. doi: 10.1016/j.anaerobe.2016.11.004
12. Methods of microbiological control of soil. Methodological recommendations [Internet resource] <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293737/4293737876.htm> (Accessed: 04.06.2022).
13. Kolchanov V.I., Prokashev A.M. Nature, economy, ecology of the Kirov region: collection of articles. Kirov: Vyatka, 1996. 589 p. (in Russian).
14. Karathanasis A.D. Subsurface migration of copper and zinc mediated by soil colloids // Soil Science Society of America Journal. 1999. V. 63. P. 830–838. doi: 10.2136/sssaj1999.634830x
15. Uvarov R., Shalavina E., Briukhanov A., Vasilev E. Aerobic solid-state fermentation of the solid fraction of pig slurry // Agronomy Research. 2020. V. 18. Special No. 2. P. 1537–1546. doi: 10.15159/AR.20.071
16. Methodical recommendations on designing the systems of disposal, processing, disinfection, storage and recycling of manure RD-APK 3.10.15.01-17 [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/495876347> (Accessed: 04.06.2022).
17. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effect of acidification of manure runoff on their microbiological characteristics // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 161–167 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
18. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N. Rational utilization of sulfuric acid waste generated during chlorine production // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-143-148

Биоэкологическая и иммунологическая оценка зерна и растений *Hordeum vulgare* L. в условиях Кировской области

© 2022. Т. К. Шешегова¹, д. б. н., в. н. с.,И. Н. Щенникова¹, д. с.-х. н., г. н. с.,Л. М. Щеклеина¹, к. с.-х. н., с. н. с., С. А. Емелев², к. с.-х. н., доцент,М. В. Черемисинов², к. с.-х. н., доцент, Н. А. Жилин¹, лаб.-исследователь,¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

²Вятский государственный агротехнологический университет,

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

e-mail: immunitet@fanc-sv.ru, i.schennikova@mail.ru

Исследования выполнены в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в 2018–2020 гг. Проанализирована таксономическая структура микрофлоры семян и устойчивость растений к наиболее распространённым грибным болезням у 18 новых сортов ярового ячменя, созданных в ФАНЦ Северо-Востока и ВятГАТУ. При высокой общей заражённости семян (в среднем 83,3%) состояние признака у сортов ФАНЦ Северо-Востока было меньше в среднем на 4,2%, чем у мутантных линий ВятГАТУ. В контаминанте семян идентифицированы представители 8 грибных таксонов: *Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., *Torula* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Curvularia* spp., *Penicillium* spp. и *Fusarium* spp. У изучаемых образцов они варьировали от трёх (Эколог, М 4-10) до шести (Новичок, Добряк, Тандем, Памяти Родины, Белгородский 100 и М 10-12). Виды *Alternaria* spp., *Bipolaris sorokiniana* и представители сапротрофов выявлены во всех сортах с частотой 13,0–48,0%, 3,0–32,0% и 2,0–52,0%; виды *Fusarium* – в 16 образцах с частотой 2–21%. Среди грибных таксонов лишь виды *Alternaria* spp. достоверно (при $P \geq 0,95$) связаны с заражённостью семян ($r = 0,45$). Значимая (при $P \geq 0,99$) связь выявлена между видами *Alternaria* spp. и *Bipolaris sorokiniana* ($r = -0,72$), что свидетельствует о возможности угнетающего действия альтернариозной инфекции на фитопатогены. Оценивая изученный генофонд ячменя по характеру и уровню заражённости семян и растений можно выделить образцы с наилучшей биоэкологической и иммунологической оценкой: сорта Добряк, Эколог, Новичок и 94-13; мутанты: М 11-13 Ха и М 2-37-6. Сорт Добряк успешно проходит государственное испытание.

Ключевые слова: ячмень, сорта и мутанты, микрофлора зерна, заражённость зерна, экологичность сорта.

Bioecological and immunological assessment of grain and plants of *Hordeum vulgare* L. in the conditions of the Kirov region

© 2022. T. K. Sheshegova¹ ORCID: 0000-0003-2371-4949² I. N. Shchennikova¹ ORCID: 0000-0002-5143-9246²L. M. Shchekleina¹ ORCID: 0000-0002-3589-5524² S. A. Emelev² ORCID: 0000-0003-4178-051X²M. V. Cheremisinov² ORCID: 0000-0002-4970-8961² N. A. Zhilin¹ ORCID: 0000-0002-6827-5102²¹Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: immunitet@fanc-sv.ru, i.schennikova@mail.ru

The research was carried out at the Federal Agricultural Research Center of the North-East (FARC) in 2018–2020. Taxonomic structure of seed's microflora and resistance of plants to the most common fungi diseases were analyzed in 18 new spring barley varieties bred in of FARC and Vyatka State Agrotechnological University (VSAU). With a high total seed infestation (average 83.3%), the trait state in the FARC's varieties was an average 4.2% less than in the VSAU's mutant lines. In the seed contaminant, representatives of 8 fungal taxa are identified: *Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., *Torula* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Curvularia* spp., *Penicillium* spp., and *Fusarium* spp. In the studied accessions, they ranged from three (cv. Ecolog, M 4-10) to six (cv. Novichok, Dobryak, Tandem, Pamiaty Rodinoy, Belgorodsky 100, and M 10-12). Species *Alternaria* spp., *Bipolaris sorokiniana* and representatives of saprotrophes were found in all varieties with a frequency of 13.0–48.0%, 3.0–32.0% and 2.0–52.0%, respectively; *Fusarium* species – in 16 accessions with a frequency of 2–21%. Among fungi taxa, only *Alternaria* spp. species are statistically significantly

(at $P \geq 0.95$) associated with seed infestation ($r = 0.45$). A reliable ($P \geq 0.99$) relation was found between the combined proportion of saprotrophes and species of *Fusarium* spp., *Alternaria* spp. and *Bipolaris sorokiniana* ($r = -0.72$), which indicates the possibility of the inhibitory effect of *alternaria* infection on phytopathogens. Assessing the studied gene pool of barley by the nature and level of infection of seeds and plants, one can select accessions with the best bioecological and immunological assessment: cv. Dobryak, Ecolog, Novichok and 94-13; mutants: M 11-13 Xa and M 2-37-6. Cv. Dobryak successfully passes the State Test.

Keywords: barley, varieties, mutants, microflora, grain contamination, environmental quality of variety.

Зерно ячменя, как важнейшей зерновой культуры используется не только в качестве корма для скота, но и в пивоваренной, пищевой, фармацевтической промышленности. Требования к его качеству в зависимости от специфики применения имеют свои особенности. Однако общим для всех партий зерна является относительно низкий микробный пул как индикатор его биологической полноценности, экологической и микотоксикологической безопасности. При этом уровень и характер семенной и растительной инфекции определяют множество факторов, из которых наиболее значимые: физиологические стрессы, параметры климатических факторов, нарушение агротехнологий возделывания, уровень патогенности микроорганизмов и отсутствие в производстве комплексно устойчивых сортов. Возделывание таких сортов до минимума снижает пестицидную нагрузку на экосистемы и обеспечивает получение экологически безопасного растительного сырья [1].

В настоящее время биоэкологии микрофлоры зерна уделяются многочисленные отечественные и зарубежные исследования [2, 3]. Особое внимание привлекают микромицеты, образующие токсичные для человека и животных вторичные метаболиты – микотоксины [4]. Среди них наиболее опасны многие виды *Fusarium* spp. [2], *Alternaria* spp. и *Bipolaris sorokiniana* [5], которые являются обильными представителями микобиоты растений и зерна ячменя. Заражённое и токсичное зерно обладает сильным негативным действием на иммунную систему теплокровных организмов [6]. Следует отметить, что в РФ предельно допустимые количества (ПДК) микотоксинов в зерне и пищевой продукции установлены только в отношении четырёх фузариотоксинов: дезоксиниваленол, зеараленол, фумонизин и Т-2 токсин. А вторичные метаболиты второго по уровню биологической опасности рода *Alternaria* в зерне не регламентируются. По данным многих исследований [7, 8], его высокая заражённость и токсичность видоспецифичными метаболитами приводят к гибели лабораторных крыс и повреждению тканей и органов у человека и животных. Поэтому

в США и странах ЕС стандартизируется более 20 опасных микотоксинов и вводится ограничение на отдельные токсины рода *Alternaria* в продуктах для детского питания [9]. Определённую опасность представляют и другие микроорганизмы, не имеющие выраженного фитопатогенного действия, например, виды *Cladosporium* spp., *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp. и др. При благоприятных условиях среды они способны к паразитированию и снижению урожая до 80%, а также к деструкции зерновок, изменению их физических свойств и химического состава [10]. Сочетанное действие патогенной и сапрофитной микрофлоры на биоценозы ячменя вызывает пятнистость листьев (тёмно-бурая, сетчатая, полосатая), корневые гнили, фузариоз и чёрный зародыш.

Все микромицеты, ассоциированные с питающими растениями-хозяевами, могут распространяться на значительные расстояния с семенным материалом [11]. Учитывая, что семена являются источником сохранения инфекции большинства болезней ячменя, внимание экотоксикологов и фитопатологов к их заражённости, особенно, чужеродными и инвазивными патогенами должно быть постоянным. Эти исследования актуализируются в связи с тем, что предпосевная обработка семян фунгицидами часто не убивает внутреннюю инфекцию, так как она, локализуясь во внутренних слоях перикарпия и в зародыше, сохраняется в жизнеспособном состоянии до 3-х лет. Кроме того, по данным [6], токсинообразующие патогенные грибы быстрее, чем другие контаминирующие зерно микроорганизмы, приобретают резистентность к фунгицидам и восстанавливают плотность популяции после обработок. Поэтому темпы роста затрат на химическую защиту не покрываются приростом чистого зерна.

Поскольку значительную селективную роль в формировании микробиологических комплексов растений и зерна играет генотип, целью наших исследований была биоэкологическая и иммунологическая оценка сортов ярового ячменя, созданных в двух Кировских НИУ: ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в ФАНЦ Северо-Востока. Объектом исследований были 18 новых сортов и мутантных линий ячменя, семена которых формировались в сходных агроэкологических условиях вегетации 2018–2020 гг. Стандарт – Белгородский 100, исходная форма для получения мутантов – Биос 1. Семена подвергались фитопатологической экспертизе [12] и микробиологическому анализу, а растения иммунологической оценке [13, 14]. Для выделения микромицетов в культуру обеззараженные в $KMnO_4$ семена закладывали в чашки Петри на картофельно-глюкозный агар (КГА) в трёхкратной повторности. Через 5 сут выросшие вокруг зерновок колонии пересевали на свежий КГА. Идентификацию микромицетов в зависимости от интенсивности роста колонии проводили на 10–14 сутки. Использовали микроскоп Биолам с увеличением от 40 до 1600 и определители [15–17].

Для характеристики структуры микробиологических комплексов применяли показатели частоты встречаемости и доминирования рода (вида). Частоту встречаемости определяли по числу зерновок, в которых таксон идентифицирован и выражали в процентах от количества инфицированных семян. Род (вид) относили к доминирующим, если его доля составляла более 50% от всех выявленных таксонов.

Для обработки экспериментальных данных применяли пакет селекционно-ориентированных и биометрико-генетических программ AGROS, версия 2.07.

Результаты и обсуждение

В ходе фитоэкспертизы выявлено, что лабораторная всхожесть семян составила в среднем по сортименту 91,5%, варьируя от 78,0% (Памяти Родины, Добряк, мутантная линия М 10-12) до 100% (Боярин, Биос 1). Значимое снижение признака отмечено у сортов: Памяти Родины, Добряк, Эколог, Белгородский 100, мутантных линий: М 10-12, М 2-37-6, М 9-5-3 ($HSP_{05} = 8,3$). Не установлено достоверной связи признака с происхождением изучаемых генотипов. Уровень лабораторной всхожести у сортов ФАНЦ Северо-Востока составил в среднем 89,3%, мутантов – 91,0%. В исследовании [5] выявлена разнонаправленная связь между всхожестью семян и представителями наиболее обильной микобиоты:

Alternaria spp. и *Bipolaris sorokiniana*. Отрицательной ($r = -0,64$) она была в контаминации с *B. sorokiniana*.

Отсутствие значимости различий между двумя генофондными группами проявилось и по общей заражённости семян ($HSP_{05} = 11,0$). При очень высоком уровне признака и широком его варьировании (от 70,5 до 93,0%) заражённость сортов составила в среднем 81,3%, мутантных линий – 85,5% (рис.). Наименьшей (70,5–75,5%) она была у сортов: 94-13, Боярин и Тандем, мутантов: М 4-10 и М 11-13 Ха. Высокая заражённость может быть спровоцирована недостатком тепла, повышенной влажностью в период налива зерновки и увеличением продолжительности созревания [10, 18]. Наши образцы семян формировались в условиях отклонения среднемесячной суммы осадков от нормы на 92–130%, средне-суточной температуры – от -2,1 до +2,3 °С в июле и августе 2018–2020 гг. Тем не менее, влияние конкретных условий среды (осадки, температура, влажность) на микобиоту (особенно *Alternaria* spp.) зерновых биоценозов является недостаточно изученным [19].

Разнообразие микробного сообщества семян ячменя было представлено грибными культурами, среди которых идентифицировали представителей 8 родовых таксонов: *Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., *Torula* spp., *Cladosporium* spp., *Stemphylium* spp., *Curvularia* spp., *Penicillium* spp. и *Fusarium* spp. Многие из этих грибов ранее были выявлены и в контаминанте семян яровой тритикале [20]. Для выяснения многообразных и сложных биоэкологических связей растения (сорта) с данными культурами их систематизировали в четыре микобиотических комплекса: грибы родов *Alternaria* и *Fusarium*; *Bipolaris sorokiniana*; сапрофиты с тёмнопигментированным мицелием, куда вошли штаммы *Cladosporium* spp., *Torula* spp., *Stemphylium* spp., *Curvularia* spp. и *Penicillium* spp. Такая систематизация обоснована уровнем биологической опасности идентифицированной микобиоты. Известно, что грибы *Fusarium*, *Alternaria* и *Bipolaris* продуцируют хозяин-специфичные токсины, вызывающие гибель растительных клеток и подавляющие защитные механизмы генотипа и в целом рассматриваются как факторы патогенности [21], а также вызывают многие болезни растений ячменя. Грибы – сапротрофы относятся к условно-патогенной таксономической группе и, в той или иной мере, являются сопутствующей микрофлорой зерна.

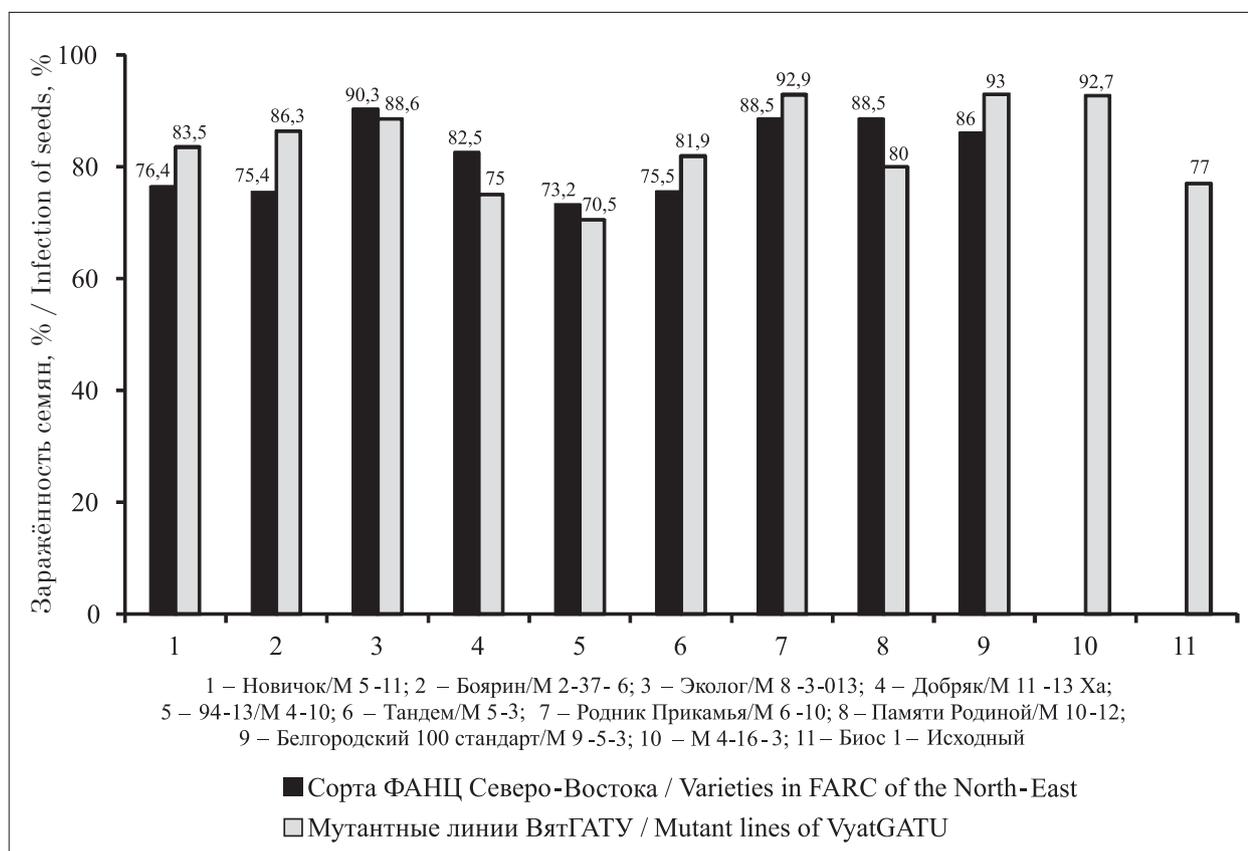


Рис. Общая заражённость семян (%) изучаемых генотипов ячменя
Fig. Total infection of seeds (%) studied barley genotypes

Численность грибных таксонов изучаемых образцов семян варьировала от трёх (Эколог, М 4-10) до шести (Новичок, Добряк, Тандем, Памяти Родины, Белгородский 100, М 10-12). При этом виды *Alternaria* spp. и *Bipolaris sorokiniana* выявлены во всех сортах с частотой от 13,0 до 48,0% и от 3,0 до 32,0%. Ранее уже сообщалось [4, 22], что альтернариозные грибы в зерновых биоценозах выполняют функцию средообразователей, поскольку численность и биомасса их, как правило, выше остальных представителей микобиоты. Грибы рода *Fusarium* (*F. oxysporum*, *F. sporotrichoides*, *F. poae* и *F. avenaceum*) идентифицированы в 16 образцах. Среди них вид *F. sporotrichoides* имел наибольшую долю в контаминанте – до 21,0%; вид *F. oxysporum* изолирован в 6 образцах, а достаточно эндемичный для нашей зоны *F. avenaceum* – лишь у мутанта М 10-12. Сапротрофная микобиота присутствовала во всех образцах с совокупной долей от 2,0 до 52,0%. Среди этой таксономической группы наибольшая представленность была у рода *Torula*, который выявлен в 14 образцах, виды *Cladosporium* spp. – в 12, *Stemphylium* spp. и *Curvularia* spp. – в 5, а *Penicillium* spp. – лишь у сорта Памяти Родины. Следует отметить, что

виды пенициллов в комплексе с другими сапротрофами (*Aspergillus* spp., *Mucor* spp., *Rhizopus* spp., *Epicoccu* spp., *Cladosporium* spp. и др.) вызывают плесневение зерна, как в поле, так и при его хранении [10]. Кроме того в комплексе с фузариозными грибами они способны негативно влиять на продукционный потенциал растений ржи [22]. Низкая представленность видов *Penicillium* spp. может иметь и филогенетическую обусловленность. В грибном контаминанте сапротрофы образовывали чаще всего бинарные и тройные консорциумы, в которых наибольшее долевое участие (15,0–52,0%) было у быстрорастущего рода *Torula*. Поэтому среди всех выявленных таксонов только его можно отнести к доминирующим.

Оценивая генофондные группы ячменя по среднему уровню микробного пула, можно отметить превышение (на 1,2; 5,0 и 5,3%) доли видов *Fusarium* spp., *Alternaria* spp. и *B. sorokiniana* и снижение (на 6,6%) доли сапротрофов у мутантных линий по сравнению с сортами ФАНЦ Северо-Востока.

Выявлено также специфичное действие таксономических групп на заражённость семян. Так, существенное (при $P \geq 0,95$) влияние оказывала альтернариозная инфекция ($r = 0,45$),

а действие *Fusarium* spp. и *B. sorokiniana* на признак было относительно слабое ($r = 0,35$ и $0,23$). Между этими группами микроорганизмов выявлена слабая положительная связь (r от $0,12$ до $0,37$) как пример возможных симбиотических взаимоотношений. Аналогичные результаты ранее получены при изучении микрофлоры семян овса [23]. Что касается сапротрофов, то их влияние на заражённость семян было отрицательным и слабым ($r = -0,10$). Между этой инфекцией и другими группами микроорганизмов выявлена достоверная (при $P \geq 0,95$) отрицательная связь ($r = -0,71$ – *Alternaria* spp., $r = -0,72$ – *B. sorokiniana*, $r = -0,49$ – *Fusarium* spp.), что опосредованно отражает присутствие конкурентных биотических взаимодействий и угнетающее действие преобладающих в микоценозе сапротрофов на фитопатогены.

Для дальнейшей иммунологической и биоэкологической оценки сортов и новых линий ячменя была проанализирована восприимчивость их к болезням, индуцируемым грибами *Bipolaris* и *Drechslera*. Устойчивостью к сетчатой пятнистости среди сортов ФАНЦ Северо-Востока характеризуются Добряк, Эколог и Новичок при степени поражения до 12,6%, к тёмно-бурой пятнистости – Новичок, Эколог, Добряк, Тандем и 94-13 при состоянии признака до 12,7%. Выявлено, что степень поражения корневыми гнилями в лабораторных тестах у большинства сортов и линий существенно (при $P \geq 0,95$) выше, чем в полевых условиях. Эта тенденция особенно характерна для генотипов с высокой заражённостью семян (Родник Прикамья, Памяти Родиной, М 10-12, М 6-10, М 8-3-013), что свидетельствует о прямом фитотоксичном действии фоновой микрофлоры на начальном этапе онтогенеза растений. В полевых условиях сложившийся гомеостаз семенной инфекции, вероятно, нарушается под действием аборигенной почвенной микрофлоры и механизмов устойчивости генотипа. Следует отметить, что степень поражения корневыми гнилями сортов ФАНЦ Северо-Востока была значительно ниже мутантных линий, однако эти изменения статистически не доказаны. Высокоустойчивых форм в том и другом генофондном материале не обнаружено. Умеренную устойчивость (развитие болезни до 20,3%) проявили сорта Боярин, Новичок и Тандем. Слабо поражаемые пятнистостями сорта Эколог и Добряк характеризуются устойчивостью к корневым инфекциям в фазу восковой спелости, но восприимчивостью к болезни в начале онтогене-

за. Среди мутантных можно выделить линии М 11-13 Ха и М 2-37-6, степень поражения которых корневыми гнилями была 33,3 и 36,0%, у наиболее восприимчивого мутанта – 64,0%.

Вредоносность корневых инфекций проявилась и в снижении нарастания биомассы корней у 14-ти дневных проростков ($r = -0,33$) при положительной и достоверной ($P \geq 0,95$) связи ($r = 0,48$) между листьями и корнями растений.

В настоящее время сорт Добряк успешно проходит Государственное сортоиспытание (ГСИ), а сорта Боярин и Памяти Дудина (мутантная линия М 8-3-013) в 2020 г. переданы на ГСИ за высокую урожайность и агроэкологическую адаптивность. Перспективными являются также мутанты М 2-37-6, М 9-5-3, М 11-13 Ха и линия 94-13 как источники ценных агро- и экобиологических признаков при создании новых сортов [24].

Заключение

Несмотря на сходные агроэкологические условия вегетации растений, выявлена более высокая заражённость семян и поражённость корневыми инфекциями мутантных линий ячменя ВятГАТУ по сравнению с сортами ФАНЦ Северо-Востока, что указывает на сортоспецифичность этих процессов. В контаминанте семян идентифицировано 8 грибных таксонов, но лишь альтернариозная инфекция достоверно связана с заражённостью семян. Обнаруженные антагонистические взаимодействия между сапротрофным микробиологическим комплексом и видами *Alternaria* spp., *Fusarium* spp. и *Bipolaris sorokiniana* свидетельствуют о возможности подавления фитопатогенов при доминировании сапротрофов в контаминанте семян. Полученные данные об уровне устойчивости сортов и мутантных линий к наиболее распространённым болезням ячменя, заражённости семян и анализ взаимоотношений микроорганизмов, представляют определённый практический и научный интерес для селекционного и производственного процесса, минимализации экологических рисков и получения биологически полноценного зерна.

References

1. Volkova G.V., Astapchuk I.L. The spread of *Pyrenophora teres* on barley crops in the North-Caucasus region // Grain Economy of Russia. 2019. No. 2. P. 263–68 (in Russian). doi: 10.31367/2079-8725-2019-62-2-63-68

2. Gagkaeva T., Gavrilova O., Orina A., Lebedin Y., Shanin I., Petukhov P., Eremin S. Analysis of toxigenic *Fusarium* species associated with wheat grain from three regions of Russia: Volga, Ural, and West Siberia // *Toxins*. 2019. V. 11. No. 5. Article No. 252. doi: 10.3390/toxins11050252
3. Müller M.E., Urban K., Kppen R., Siegel D., Korn U., Koch M. Mycotoxins as antagonistic or supporting agents in the interaction between phytopathogenic *Fusarium* and *Alternaria* fungi // *World Mycotoxin Journal*. 2015. V. 8. P. 311–321. doi: 10.3920/WMJ2014.1747
4. Gavrilova O.P., Orina A.S., Gogina N.N., Gagkaeva T.Yu. Co-occurrence of the metabolites of *Alternaria* and *Fusarium* fungi associated with small-grain cereals // *Rossiiskaya selskokhoziaistvennaya nauka*. 2020. No. 6. P. 20–23 (in Russian). doi: 10.31857/S2500262720060058
5. Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Hannibal F.B. Micromycetes *Alternaria* spp. and *Bipolaris sorokiniana* and mycotoxins in grain from the Ural Region // *Mikologiya i Fitopatologiya*. 2020. V. 54. No. 5. P. 365–377 (in Russian). doi: 10.31857/S0026364820050086
6. Monastyrsky O.A. Infection of seeds with toxic-forming fungi // *Agro XXI*. 2000. No. 4. P. 6–7 (in Russian).
7. Fraeyman S., Croubels S., Devreese M., Antonissen G. Emerging *Fusarium* and *Alternaria* mycotoxins: occurrence, toxicity and toxicity and toxicity and toxicokinetics // *Toxins*. 2017. V. 9. No. 7. Article No. 228. doi: 10.3390/toxins9070228
8. Kononenko G.P., Burkin A.A., Zotova E.V., Mycotological monitoring. Part 2. Wheat, barley, oat and maize grain // *Veterinary Science Today*. 2020. V. 2. No. 33. P. 139–145 (in Russian). doi: 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145
9. Rychlik M., Lepper H., Weidner C., Asarn S. Risk evaluation of the *Alternaria* mycotoxic tenuazonic acid in foods for adults and infants and subsequent risk management // *Food Control*. 2016. V. 68. P. 181–185. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.03.035
10. Lavrinova V.A. Change of contamination of winter wheat seeds at storage // *Zashchita i karantin rastenij*. 2015. No. 8. P. 15–16 (in Russian).
11. Lavrinova V.A., Polunina T.S., Gusev I.V. Fungicides against micromycetes complex on winter wheat seeds in north-east of Central Black Earth Region // *International Research Journal*. 2018. No. 10 (76). P. 81–84 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2018.76.10.016
12. Benken A.A., Khrutovskaya V.N. Laboratory assessment of the disease resistance of plants and the parasitic properties of pathogens of ordinary root rot // *Proceedings of a squal*. 1977. P. 9–13 (in Russian).
13. Grigoriev M.F. Guidelines for the study of the stability of grain crops to root rot. Leningrad: VIR, 1976. 60 p. (in Russian).
14. Petrova O.S., Afanasenko O.S. Methodical recommendations for the diagnosis and methods for assessing the resistance of oats to the causative agents of the leaves spotting. Sankt-Peterburg: Vizr, 2003. 28 p. (in Russian).
15. Bilai V.I. Fusarya. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 442 p. (in Russian).
16. Pidoplicko N.M. Mushrooms – parasites of cultivated plants. Determinant. Minsk: Naukova Dumka, 1977. V. 2. 299 p. (in Russian).
17. Khasanov B.A. The determinant of mushrooms – causative agents of “gelminorizes” of plants from labor *Bipolaris*, *Drechslera*, *Exserohilum*. Tashkent: Fan, AN UzbSSR, 1992. 232 p. (in Russian).
18. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Shchennikova I.G., Martyanova A.N. Dependence of fungi infection development of cereals on seasonal dynamics of climatic factors // *Achievements of science and technology of agro-industrial complex*. 2017. V. 31. No. 4. P. 58–62 (in Russian).
19. Gannibal F.B. Factors influencing *Alternaria* appearance in grains in European Russia // *Agricultural Biology*. 2018. V. 53. No. 3. P. 605–615 (in Russian). doi: 10.15389/agrjbiology.2018.3.605
20. Sheshhegova T.K., Batalova G.A., Polyplaova L.A., Kovtunenkov V.Ya., Panchenko V.V., Kaldsa A.P. Immunological and selection value of new lines of spring triticale // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 104–109 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-104-109
21. Phan C.S., Li H., Kessler P.S., Solomon P.S., Piggott A.M., Piggott A.M., Chooi Y.H. Bipolenins K-N: New sesquiterpenoids from the fungal plant pathogen *Bipolaris sorokiniana* // *Beilstein J. Org. Chem*. 2019. V. 15. P. 2020–2028. doi: 10.3762/bjoc.15.198
22. Shirokikh I.G., Sheshhegova T.K. Complex of soil micromycetes under winter rye and its transformation under the impact of *Fusarium* infection // *Eurasian Soil Science*. 2005. No. 8. P. 874–879 (in Russian).
23. Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Loskutov I.G. Symbiotic relationships between aggressive *Fusarium* and *Alternaria* fungi colonizing oats grain // *Agricultural Biology*. 2017. V. 52. No. 5. P. 986–994 (in Russian). doi: 10.15389/agrjbiology.2017.5.986
24. Zhilin N.A., Zaytseva I.Yu., Shchennikova I.N., Emelev S.A. Effectiveness of the barley cultivar ‘Bios 1’ as source material for breeding // *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020. No. 181 (2). P. 96–100 (in Russian). doi: 10.30901/2227-8834-2020-2-96-100

Изучение свойств местных изолятов фитопатогенного гриба *Parastagonospora nodorum*

© 2022. А. В. Бакулина, к. б. н., зав. лабораторией,

Д. В. Попыванов, к. б. н., н. с.,

А. В. Харина, к. с.-х. н., н. с.,

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина д. 166а,

e-mail: mol-biol@fanc-sv.ru

С целью изучения культурально-морфологических и патогенных свойств грибов-возбудителей септориоза пшеницы в условиях Кировской области с поражённых растений выделяли изоляты фитопатогенных грибов. В ходе работы из 38 выделенных в чистую культуру изолятов восемь были идентифицированы по культурально-морфологическим показателям как возбудители септориоза колоса пшеницы (*Parastagonospora nodorum*). Видовая принадлежность подтверждена с помощью ПЦР в реальном времени с использованием коммерческой тест-системы «Септориоз злаков (*Stagonospora nodorum*)» («АгроДиагностика», Россия). На основании экспериментальных данных предложена модификация методики выделения грибов-возбудителей септориоза пшеницы. Культурально-морфологические признаки местных изолятов *P. nodorum* (TR1, TR2, P12, H7, H9, KR, SB, TC) охарактеризованы на картофельно-глюкозном (КГА) агаре. Установлено, что использование в качестве питательной среды солодово-дрожжевого агара в сравнении с КГА стимулировало скорость роста изолята *P. nodorum* KR и не повлияло на интенсивность роста других изолятов гриба. Оценка патогенных свойств местных изолятов *P. nodorum* на растениях пшеницы показала, что к высокопатогенным относятся изоляты TC и H9. Их следует рекомендовать для скрининга устойчивости к септориозу широкого спектра генотипов пшеницы, выращиваемых в условиях Кировской области.

Ключевые слова: септориоз колоса пшеницы, *Parastagonospora nodorum*, культурально-морфологические свойства, пикноспоры, скорость роста, патогенность.

Study of the properties of local isolates of *Parastagonospora nodorum*

© 2022. A. V. Bakulina ORCID: 0000-0002-5171-2476

D. V. Popov ORCID: 0000-0002-4978-4542

A. V. Kharina ORCID: 0000-0002-0554-5814

Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,

166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

e-mail: mol-biol@fanc-sv.ru

To study the cultural, morphological and pathogenic properties of fungi that cause Septoria blotch of wheat in the conditions of the Kirov region, phytopathogenic fungi were isolated from the affected plants. Of the 38 fungal isolates selected in pure culture, eight were identified by cultural and morphological features as *Parastagonospora nodorum* which causes Septoria nodorum blotch (SNB). To confirm the species identity, the DNA of fungi was used for real-time PCR using the commercial test system “Septorioz zlakov (*Stagonospora nodorum*)” (“AgroDiagnostika”, Russia). Based on experimental data, a modification of the method for isolating fungi that cause Septoria blotch of wheat is proposed. Cultural and morphological properties of local *P. nodorum* isolates (TR1, TR2, P12, H7, H9, KR, SB, TC) were characterized on potato-glucose agar (PGA). The use of malt-yeast agar as a medium in comparison with PGA stimulated the growth rate of the *P. nodorum* KR isolate and did not affect the growth rate of other fungal isolates. Evaluation of the pathogenic properties of local *P. nodorum* isolates on wheat plants showed that TC and H9 isolates are highly pathogenic. These isolates can be used to screen the resistance to SNB of a wide range of wheat genotypes grown in the Kirov region.

Keywords: Septoria nodorum blotch, *Parastagonospora nodorum*, cultural and pathogenic properties, pycnidospores, growth rate.

Септориоз листьев и колоса долгое время является одним из наиболее распространённых и вредоносных заболеваний пшеницы на всей территории её возделывания [1]. В России возбудители септориоза занимают доминирующее положение среди грибных болезней пшеницы, а потери урожая этой важнейшей зерновой культуры, вызванные септориозом, составляют в разные годы от 10 до 60% [2]. Среди превентивных мер борьбы с заболеванием выделяют: контроль заражённости посевного материала, соблюдение сроков посева, либо использование фунгицидов, оказывающих негативное влияние на состояние окружающей среды. Экологически безопасным и эффективным способом борьбы с септориозом является создание устойчивых генотипов пшеницы. Посевы устойчивых сортов способны препятствовать развитию эпифитотического процесса и ограничить географическую экспансию патогена [1, 3]. При этом эффективность «главных» генов (major genes) устойчивости хозяина, которые преимущественно используются в селекции, в значительной мере обусловлена генетическими особенностями самого патогена [4]. Создание коллекции местных популяций грибов необходимо для изучения патогенного комплекса возбудителя и отбора устойчивых форм растений.

Возбудителями септориоза пшеницы являются преимущественно два вида грибов: *Zymoseptoria tritici* и *Parastagonospora nodorum*, соотношение которых в значительной степени зависит от региона выращивания. На юге России доминирует вид *Z. tritici*, а по направлению к северу и востоку соотношение возбудителей меняется в сторону вида *P. nodorum*. Гораздо реже по сравнению с двумя этими видами встречается гриб *Parastagonospora avenae* f. sp. *triticea*, который, хотя и отмечен во всех высевающих пшеницу регионах страны, никогда не является доминирующим в патоккомплексе [5].

Целью настоящей работы явилось выделение, идентификация и изучение культурально-морфологических признаков и патогенности изолятов грибов-возбудителей септориоза пшеницы в условиях Кировской области.

Объекты и методы исследования

Для выделения местных изолятов возбудителей септориоза использовали поражённые листья и колосковые чешуи яровой мягкой пшеницы различных сортов, отобранные на

опытном поле ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (с. Красное, г. Киров). Сравнивали эффективность двух методик выделения чистых культур: 1) извлечение пикнид гриба иглой с поражённых тканей растений с использованием стереомикроскопа (увеличение 200) и последующим переносом пикнид на питательную среду (ПС); 2) высев методом штриха споровой суспензии гриба, полученной в асептических условиях с временного препарата фрагментов поражённых тканей, с использованием светового микроскопа (увеличение 400) [6].

Культивирование грибов проводили на картофельно-глюкозном агаре (КГА) с добавлением цефотаксима (100 мг/л) для подавления роста бактерий. Через 7–8 сут культивирования при 20–25 °С единичные колонии отсеивали, отслеживая стабильность изолятов при трёх последовательных пересевах 10-суточных колоний на свежую ПС. Культурально-морфологические признаки изолятов оценивали на среде КГА согласно [7–9]. Для стимуляции спорообразования колонии *P. nodorum* выращивали в закрытых стеклянных чашках Петри при постоянном облучении эритемной лампой ЛЭ-30А с длиной волны 253,7 нм в течение 30 сут. Скорость роста колоний оценивали на двух средах: КГА и солодово-дрожжевом агаре (СДА). Для определения радиальной скорости роста колоний (K_r , мм/сут) проводили ежесуточное измерение диаметра колоний в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Расчёт осуществляли по формуле:

$$K_r = (d_2 - d_1) / (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где d_1 и d_2 – диаметр колоний (мм) в начальный и конечный момент времени t_1 и t_2 (сут).

Молекулярно-генетическую идентификацию грибов проводили методом ПЦР в режиме реального времени. Выделение ДНК осуществляли с помощью набора проба ЦТАБ («ДНК-технология», Москва), согласно инструкции изготовителя. Для постановки ПЦР использовали коммерческую тест-систему «Септориоз злаков (*Stagonospora nodorum*)» («Агродиагностика», Россия). Реакцию амплификации проводили на приборе ДТ-Лайт («ДНК-технология», Россия), регистрирующем флуоресценцию. Реакционная смесь (35 мкл) содержала 5 мкл исследуемой ДНК, режим ПЦР согласно рекомендациям изготовителя. В качестве отрицательного контроля использовали образец контроля выделения,

прошедший все стадии выделения ДНК, но не содержащий мицелия гриба. Учёт результатов ПЦР проводили автоматически с помощью программы RealTime_PCR v.7.9. Кривые флуоресценции анализировали путём прямого сравнения кривых, вычисляя значение точки C_p (crossing point) на графике накопления ДНК по форме кривой (метод максимума второй производной).

Изучение патогенных свойств выделенных изолятов грибов проводили на растениях пшеницы. Споровую суспензию получали при твёрдофазном культивировании грибов на субстрате из перловой крупы в культивационных ёмкостях объёмом 500 мл. Для их инокуляции использовали выращенные на КГА колонии, мицелий отбирали пробочным сверлом диаметром 10 мм. Количество посевного материала: 2 агаровых блока с мицелием диаметром 10 мм. Культивирование осуществляли при 22–25 °С и облучении 14 ч/сут эритемной лампой ЛЭ-30 в течение 10 сут. Для приготовления споровой суспензии субстрат с мицелием гриба разводили стерильной дистиллированной водой, измельчали и фильтровали через марлю. Для подсчёта количества спор использовали камеру Горяева.

Оценку патогенности местных изолятов проводили на яровой пшенице сортов Баженка (слабовосприимчивый), Уйская (восприимчивый), Дарья (устойчивый), подобранных по степени поражения септориозом согласно оценке в естественных полевых условиях. Семена выращивали в рулонной культуре по 25 шт., повторность трёхкратная. Споровую суспензию (10^6 спор/мл) наносили на растения при помощи пульверизатора на 10 сут. После инокуляции среднюю степень поражения сортов (%) учитывали [10] несколько раз через равные промежутки времени. К слабопатогенным относили штаммы, поражающие тест-сорта менее чем на 20%, к среднепатогенным – 20–50%, к сильнопатогенным – более 50% [11]. Также определяли площадь под кривой развития болезни (ПКРБ) в условных единицах [12, 13] по формуле:

$$S = 1/2(x_1 + x_2)(t_2 - t_1) + \dots + (x_{n-1} + x_n)(t_n - t_{n-1}), \quad (2)$$

где S – площадь под кривой развития болезни; n – количество учётов; x_1 – степень развития болезни на момент первого учёта, %; x_2 – степень развития болезни на момент второго учёта, %; x_n – степень развития болезни на момент последнего учёта, %; $(t_2 - t_1)$ – ко-

личество дней между вторым и первым учётом; $(t_n - t_{n-1})$ – количество дней между последним и предпоследним учётом.

Обработку полученных данных проводили стандартными статистическими методами [14] с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

С фрагментов поражённых септориозом тканей пшеницы в чистую культуру было выделено 38 изолятов фитопатогенных грибов. Ни один из 24 изолятов, выделенных путём посева иглой из пикнид, не принадлежал к родам *Zymoseptoria* и *Parastagonospora*. На основании культурально-морфологических свойств данные изоляты отнесены к родам: *Acremonium*, *Ulocladium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* [7].

Большую эффективность показал подход, заключающийся в посеве споровой суспензии с характерными для целевых видов пикноспорами (конидиями) непосредственно с временного препарата после его микроскопии. Таким образом, в чистую культуру было выделено 14 изолятов фитопатогенных грибов, из которых в дальнейшем восемь (57%) были идентифицированы как *P. nodorum* – возбудитель септориоза колоса пшеницы.

Культурально-морфологические свойства полученных изолятов *P. nodorum* оценивали на КГА на 20 сут культивирования. Внешний вид колоний, их описание и диаметр приведены в таблице 1 (см. цв. вкладку VI). Изоляты TR1, TR2, P12, H7, H9, KR согласно [8] имели морфотип I (однородный, светлый), изоляты SB и TC – морфотип III (смешанный). Известно, что морфология колоний *P. nodorum* связана со спорулирующей способностью: высокой спорулирующей способностью отличаются изоляты с гранулированным типом колоний, редким мицелием и большим количеством пикнид [8]. У исследованных изолятов *P. nodorum* не выявлено способности к формированию на среде КГА большого количества пикнид.

При росте на КГА большинство изолятов (62,5%) характеризовались как быстрорастущие ($d > 70$ мм), один изолят (TR1) – как медленно растущий ($d < 60$ мм), два изолята (H-7 и SB) имели среднюю скорость роста ($d = 60–70$ мм) [8]. С целью выбора оптимальной среды для культивирования местных изолятов *P. nodorum* сравнивали их скорость роста на КГА и СДА. Средний диаметр коло-

ний 75% исследованных культур при выращивании на СДА, превосходил этот показатель на КГА (от 1,8 до 23,0 мм в зависимости от изолята). На среде СДА было отмечено достоверное увеличение K_r у *P. nodorum* KR, тогда как у остальных изолятов гриба данный показатель на использованных ПС значительно не различался (рис. 1). Изоляты SB, TC, TR1 при культивировании на СДА характеризовались увеличением K_r на 0,8–1,1 мм/сут. Таким образом, для большинства исследованных изолятов *P. nodorum* культивирование на СДА не выявило преимуществ в росте гриба в сравнении с КГА.

Для подтверждения видовой идентификации ДНК восьми местных изолятов грибов подвергали ПЦР-анализу с использованием коммерческой тест-системы «Септориоз злаков (*Stagonospora nodorum*)». У всех исследованных изолятов на основании молекулярно-генетического анализа подтвердилась принадлежность к виду *P. nodorum*. Кривые амплификации и значения C_p приведены на рисунке 2.

В связи с разнообразием культурально-морфологических свойств патогенов *P. nodorum* и *Z. tritici*, длительным спорообразованием и наличием видов, обладающих фенотипическим сходством использование молекулярно-генетического подхода значительно упрощает

процедуру выделения целевых патогенов. На рисунке 3 показана использованная нами схема выделения и идентификации гриба *P. nodorum*, которая за счёт селективных приёмов (споровая суспензия после микроскопии для посева и ПЦР для подтверждения видовой принадлежности), позволяет быстро и эффективно выделить данный патоген. В связи с доступностью на рынке ПЦР тест-систем для идентификации различных видов фитопатогенных грибов данная схема выделения в чистую культуру может быть применима и для других видов.

Важным свойством гриба *P. nodorum* является патогенность его различных штаммов. Патогенность местных изолятов гриба *P. nodorum* исследовали на растениях яровой мягкой пшеницы сортов Баженка, Дарья и Уйская. Установлено, что по средней степени поражения тест-сортов к слабопатогенным относится изолят Н7, к среднепатогенным – большинство изолятов (TR1, TR2, SB, KR, P12, Н9), к высокопатогенным – ТС (рис. 4).

Согласно показателю ПКРБ, отражающему степень нарастания септориоза во времени, выявлено, что наибольшей патогенностью характеризуются штаммы ТС и Н9. При инокуляции всех исследованных сортов пшеницы ПКРБ для изолятов ТС и Н9 превышал 150 усл. ед. (рис. 5) и значительно превосходил

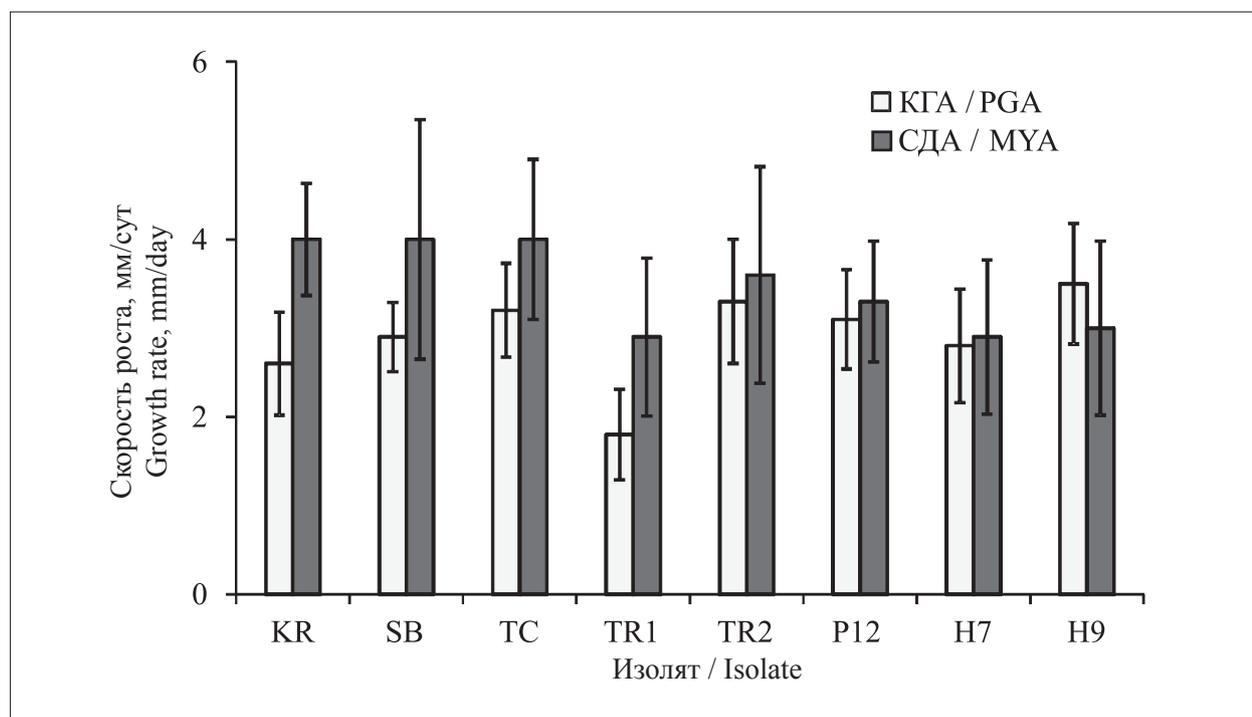
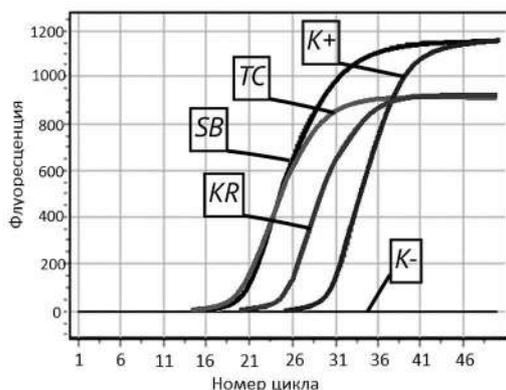


Рис. 1. Скорость роста изолятов *P. nodorum* на КГА и СДА
Fig. 1. Growth rate of *P. nodorum* isolates on PGA and MYA

Номер лунки	Идентификатор пробирки	Ср, C_p	Результат
A1	KR	25,1	+
A3	SB	20,6	+
A4	TC	20,3	+
A6	K+	30,4	+
A7	K-		-

Изоляты KR, SB, TC



Номер лунки	Идентификатор пробирки	Ср, C_p	Результат
A1	TR1	28,7	+
A4	TR2	27,0	+
A5	P12	29,0	+
A8	H7	23,2	+
F2	H9	27,9	+
F3	K+	30,4	+
F5	K-		-

Изоляты TR1, TR2, P12, H7, H9

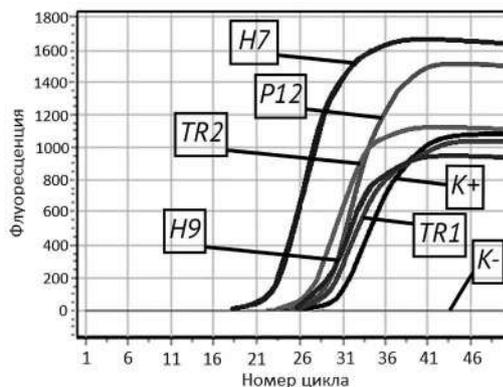


Рис. 2. Результаты амплификации ДНК местных изолятов *P. nodorum*. Идентификатор пробирки соответствует наименованию изолята, цвет кривой флуоресценции соответствует таковому для номеров лунок, «K+» – положительный контроль; «K-» – отрицательный контроль; C_p – значение точки crossing point; «+» – положительный результат, «-» – отсутствие амплификации
Fig. 2. Results of DNA amplification of local *P. nodorum* isolates. The tube identifier corresponds to the name of the isolate, the color of the fluorescence curve corresponds to that of the well numbers, “K+” – positive control; “K-” – negative control; C_p – the value of the crossing point; “+” positive result, “-” no amplification

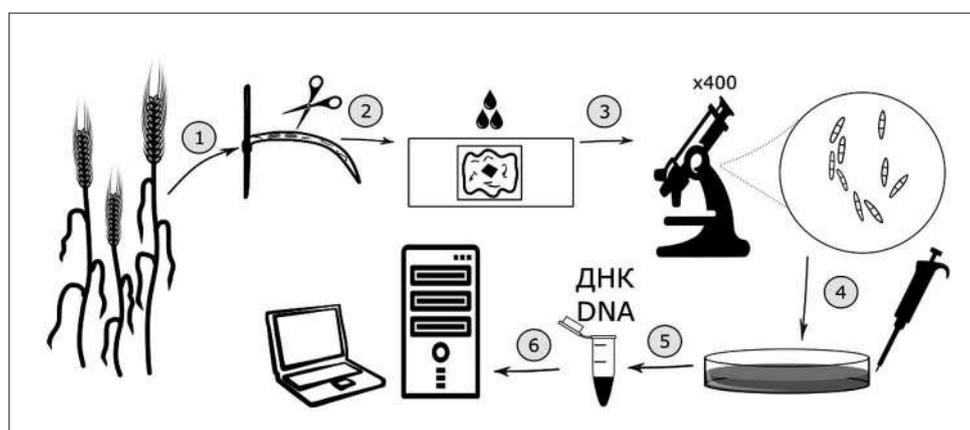


Рис. 3. Схема выделения и идентификации изолятов *P. nodorum*:
 1 – отбор материала с поражённых септориозом растений пшеницы; 2, 3 – приготовление временного препарата и микроскопирование (увеличение $\times 400$); 4 – посев споровой суспензии на ПГА;
 5 – выделение ДНК из колоний гриба; 6 – проведение ПЦР со специфичными праймерами
Fig. 3. Scheme of isolation and identification of *P. nodorum* isolates:
 1 – selection of material from wheat plants affected by Septoria blotch; 2, 3 – preparation and microscopy of a temporary preparation (magnification $\times 400$); 4 – sowing of a spore suspension on PGA; 5 – isolation of DNA from fungal colonies; 6 – PCR with specific primers

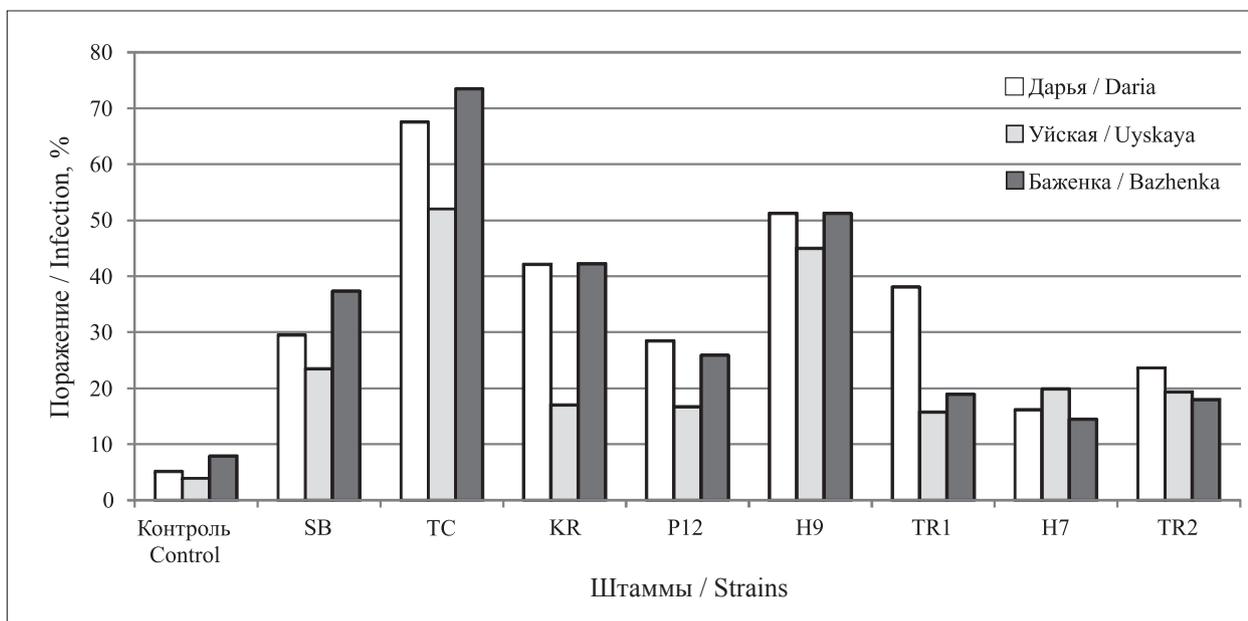


Рис. 4. Степень поражения яровой пшеницы в рулонной культуре на 10 сутки после инокуляции споровой суспензией местными изолятами *P. nodorum*
Fig. 4. The value of the disease to spring wheat in a roll culture on the 10th day after inoculation with a spore suspension with local *P. nodorum* isolate

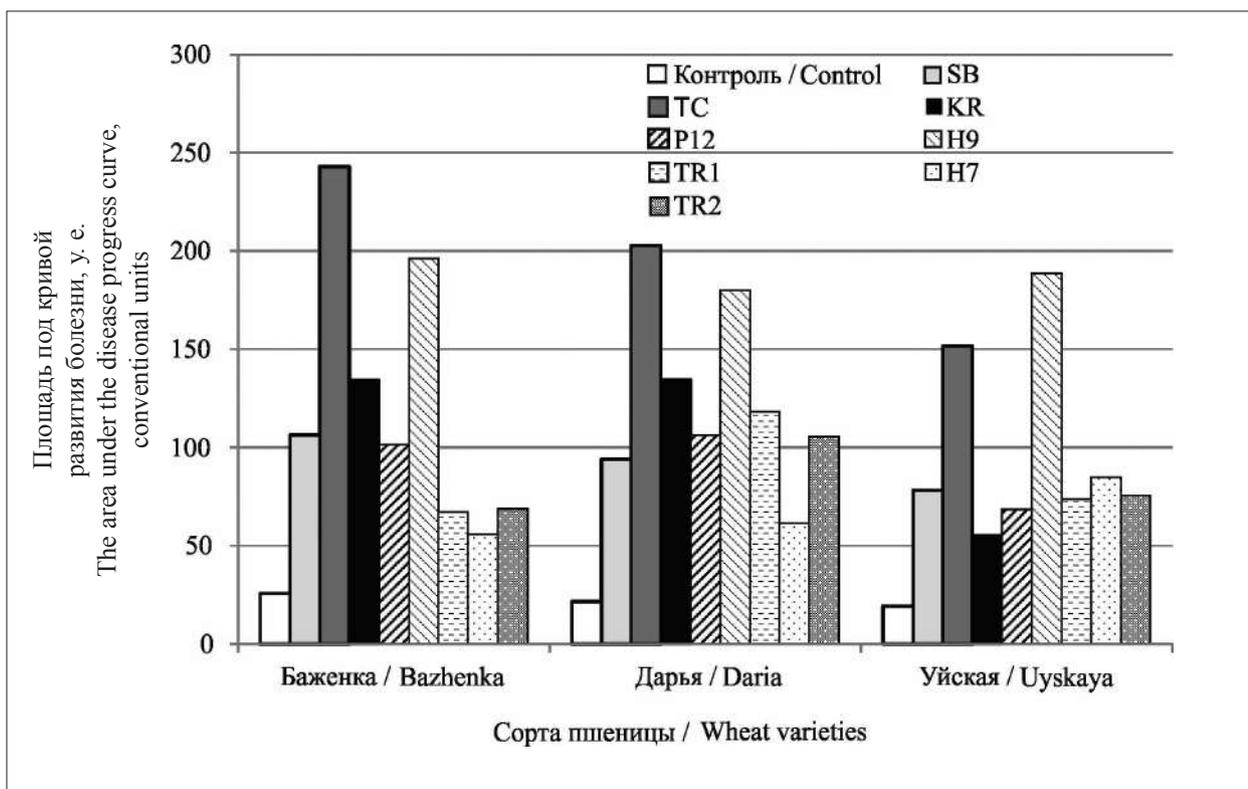


Рис. 5. Степень нарастания септориоза при инокуляции пшеницы различных сортов местными изолятами *P. nodorum*
Fig. 5. The degree of increase of SNB during inoculation of three wheat varieties with local *P. nodorum* isolates

этот показатель, рассчитанный для остальных исследуемых изолятов. Таким образом, изоляты *P. nodorum* ТС и Н9 в дальнейшем могут быть использованы для скрининга устойчивости к септориозу широкого спектра генотипов пшеницы, выращиваемых в Кировской области.

Заключение

Итак, в результате проведённых исследований предложена модификация методики выделения грибов-возбудителей септориоза пшеницы с применением ПЦР-анализа, доступная для использования ввиду наличия коммерческих тест-систем. Выявлено, что местные изоляты фитопатогенного гриба *P. nodorum* имеют преимущественно однородный светлый морфотип колоний, быстрорастущих на КГА. Выделенные высокопатогенные изоляты *P. nodorum* ТС и Н9 рекомендованы для скрининга исходного материала яровой мягкой пшеницы в условиях Кировской области при ведении селекции на устойчивость к септориозу, которая служит эффективным и экологически безопасным подходом для борьбы с заболеванием. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на мониторинге динамики изменения видового состава грибов, входящих в патоккомплекс поражённых септориозом растений пшеницы в регионе, а также пополнении коллекции местных изолятов возбудителей септориоза штаммами *Z. tritici* и *P. avenae*.

References

1. Toropova E.Yu., Kazakova O.A., Piskarev V.V. *Septoria* blotch epidemic process on spring wheat varieties // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. V. 24. No. 2. P. 139–148. doi: 10.18699/VJ20.609
2. Zeleneva Y.V., Afanasenko O.S., Soodnikova V.P. Influence of agroclimatic conditions, life form and host species on the species complex of wheat *Septoria* pathogens // Povolzhskiy J. of Ecology. 2020. No. 2. P. 177–190 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2020-2-177-190
3. Orlovskaya O.A., Vakula S.I., Khotyleva L.V. Study of bread wheat lines with genetic material of *Triticum* species for resistance to fungal diseases // Agricultural Biology. 2021. V. 56. No. 1. P. 171–182 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiol.2021.1.171eng
4. Bakulina A.V., Kharina A.V., Shirokikh A.A. *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* blotch of wheat: genetic control of host resistance (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 26–35 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-026-035
5. Pakholkova E.V., Sal'nikova N.N., Akimova E.A., Sanina A.A. Features of the spread of pathogens *Septoria* on wheat crops in the Russian Federation // Current Mycology in Russia: Manual of proceedings. V. 5. Moskva, 2015. P. 107–108 (in Russian).
6. Sanina A.A., Antziferova L.V. Isolation and storage methods of *Septoria* pathogens on the wheat // Mikologiya i Fitopatologiya. 1989. V. 23. No. 2. P. 172–175 (in Russian).
7. Satton D., Fotergill A., Rhinaldi M. Key pathogenic and conditionally pathogenic fungi. Moskva: Mir, 2001. 486 p. (in Russian).
8. Pakholkova E.V. *Septoria* of grain crops in various regions of the Russian Federation: Abstract of the dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Bolshie Vyazemy, 2003. 28 p. (in Russian).
9. Zeleneva Y.V., Sudnikova V.P., Kashkovsky A.A. Study of culturally-morphological characteristics of fungi of genus *Septoria* on territory of CBR growing on potato-glucose culture medium // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2012. No. 17 (1). P. 384–389 (in Russian).
10. Kolomiets T.M., Pakholkova E.V., Pankratova L.F., Skatenok O.O. The role of genetic collections in the breeding of spring wheat for immunity to *Septoria* // Modern Science Success. 2017. V. 2. No. 9. P. 130–137 (in Russian).
11. Pakholkova E.V., Sal'nikova N.N., Kurkova N.A. Genetic structure of regional populations of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*), the *Septoria* leaf blotch agent of wheat // Agricultural Biology. 2016. V. 51. No. 5. P. 155–160 (in Russian).
12. Hogenson R.O., Hosford R.M. Sexual reproduction in *Leptosphaeria avenaria* f. sp. *triticea* induced by wave lengths of light greater than 560 mμ // Mycologia. 1971. V. 63. No. 5. P. 958–963. doi: 10.1080/00275514.1971.12019190
13. Shaner G., Finney R.E. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat // Phytopathology. 1977. V. 67. No. 8. P. 1051–1056.
14. Lakin G.F. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 352 p. (in Russian).

Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства

© 2022. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, 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,
³Институт 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

В результате выполненных исследований установлено, что систематическое внесение значительных объёмов жидкой фракции (ЖФ) навозных стоков в пашню приводит к существенной трансформации физико-химических свойств агрозёмов. Под влиянием ЖФ в пахотном горизонте значительно повышается содержание подвижных форм фосфора (до 980–1170 мг/кг), обменного калия (до 860 мг/кг), органического вещества, снижается кислотность. Жидкая фракция навозных стоков крупного рогатого скота (КРС) способствует более выраженному повышению pH_{KCl} и более интенсивному накоплению органического вещества, чем ЖФ свиных навозных стоков, что, возможно, обусловлено разным химическим составом навоза. Навоз КРС содержит больше соединений Са и Mg, способствующих снижению кислотности, а также лигнина и клетчатки, приводящих к накоплению в почве гумуса. Концентрации всех изученных тяжёлых металлов (ТМ) в почве пашни не превышали значения, характерные для агрозёмов Кировской области. Вместе с тем, содержание валовых и подвижных форм Cu, Cd и Pb в обследуемых агрозёмах оказалось выше, чем на фоновых территориях. Количество ТМ в стеблях кукурузы не превышало обычное содержание этих элементов в растениях незагрязнённых территорий. Индексы аккумуляции всех изученных ТМ, кроме Cu, были существенно выше при выращивании растений на кислых почвах. Возможной причиной повышенной биодоступности Cu для растений в нейтральных почвах может быть образование растворимых хелатных комплексов меди. Результаты исследований свидетельствуют о глубокой трансформации агрохимических свойств агрозёмов под влиянием ЖФ. Для предотвращения загрязнения окружающей среды в районе размещения животноводческих комплексов необходимо совершенствование действующей системы утилизации отходов животноводства и внедрение технологий, позволяющих транспортировать отходы на более значительные расстояния.

Ключевые слова: навозные стоки, загрязнение почвы, тяжёлые металлы, индекс аккумуляции, деградация агрозёмов.

Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste

© 2022. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[?]
L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146[?]
T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[?]
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Systematic introduction of significant volumes of liquid fraction (LF) of manure effluents into arable land leads to a significant transformation of the physical and chemical properties of agrozems. Under the influence of LF, the content of mobile forms of phosphorus (up to 980–1170 mg/kg), exchangeable potassium (up to 860 mg/kg), and organic matter in the arable horizon significantly increases, and acidity decreases. The LF of manure effluents of cattle contributes to a more pronounced increase pH_{KCl} and a more intensive accumulation of organic matter than the LF of pig manure effluents, which may be due to the different chemical composition of manure. Cattle manure contains more Ca and Mg, which lower the pH, as well as lignin and fiber, leading to the accumulation of humus in the soil. The concentration of all studied heavy metals (HM) in arable land did not exceed the values typical for agrozems of the Kirov region. The content of gross and mobile forms Cu, Cd, Pb in the surveyed agro-ecosystems turned out to be higher than in the background territories. The amount of HM in corn stalks did not exceed the usual content of these elements in plants of uncontaminated territories. The accumulation indices of all studied HM, except Cu, were significantly higher when growing plants on acidic soils. A possible reason for the increased bioavailability of Cu for plants in neutral soils may be the formation of soluble chelate complexes. To prevent environmental pollution in the area of livestock complexes, it is necessary to improve the existing system of animal waste disposal and introduce technologies that allow waste to be transported over long distances.

Keywords: manure runoff, soil pollution, heavy metals, accumulation index, degradation of agrozem.

Функционирование современного промышленного животноводства сопряжено с образованием больших объёмов отходов, основным из которых является навоз – смесь твёрдых и жидких экскрементов сельскохозяйственных животных (НЖ). Согласно официальной статистике общее поголовье крупного рогатого скота (КРС), содержащегося в хозяйствах всех категорий, в Российской Федерации (РФ) в 2021 г. составило 18535,2 тыс. голов, поголовье свиней – 27347,7 тыс. голов. При содержании такого количества животных расчётная масса ежегодного образования навоза КРС достигает 372 млн т, навоза свиней – 45 млн т. **С соответствующим количеством отходов в окружающую среду ориентировочно поступает до 43,16 млн т органических веществ; 1,03 млн т связанного азота; 970 тыс. т P_2O_5 , 1,5 млн т K_2O , а также широкий спектр других химических элементов, входящих в состав кормов и витаминно-минеральных премиксов (расчёты выполнены в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17; принятая влажность навоза – 88%).**

Основным направлением утилизации НЖ является использование их в качестве органических удобрений. Однако локализация животноводческих предприятий на ограниченных территориях и высокие затраты на доставку соответствующих удобрений до мест внесения приводят к формированию выраженного дисбаланса в распределении биогенных отходов по посевным площадям. Поскольку транспортирование НЖ на расстояние более 7–15 км практически не окупается прибавкой урожая выращиваемых культур [1, 2], животноводческие хозяйства вынуждены вносить эти удобрения в пахотные поля, расположенные в непосредственной близости от мест образования и обработки отходов. Регулярное и долговременное внесение больших объёмов

НЖ на ограниченные площади приводит к загрязнению территорий широким спектром разнообразных химических веществ, включая тяжёлые металлы (ТМ), подвижные соединения фосфора, легко окисляемые органические вещества. Под воздействием НЖ изменяется почвенная микробиота, оказывающая непосредственное влияние на состояние и миграционную способность химических элементов в окружающей среде [3–5]. Для обеспечения экологической устойчивости агроландшафтов и предотвращения деградации земель сельскохозяйственного назначения вблизи животноводческих предприятий необходимо получение объективной информации о динамике трансформации химического состава почв под воздействием высоких норм НЖ.

Цель настоящей работы состояла в оценке влияния долговременного внесения высоких норм обеззараженной жидкой фракции свиного навоза и навоза КРС на химический состав пахотного горизонта агрозёмов и содержание ТМ в выращиваемых культурах.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследований были выбраны пахотные поля, расположенные в центральной части Кировской области (ЦКО) вблизи крупного свиноводческого комплекса откормочного типа (агрозём 1) и молочной фермы с беспривязным содержанием коров (агрозём 2). Почва обследуемых полей дерново-подзолистая среднесуглинистая на покровных суглинках. Применяемая на животноводческих предприятиях технология обработки навозных стоков включает разделение отходов на твёрдую и жидкую фракции (методом сепарирования) с последующим обеззараживанием жидкой фракции (ЖФ) в прудах-накопителях (лагунах), а твёрдой

фракции – на специально оборудованных площадках. После обеззараживания ЖФ вносится в пашню, расположенную вблизи очистных сооружений, а твёрдую фракцию можно транспортировать на более значительные расстояния. Периодичность внесения – ежегодно в течение 6 лет. Метод внесения ЖФ – внутрпочвенный с использованием высокопроизводительных шланговых систем. Нормы внесения ЖФ устанавливает агрохимическая служба предприятий в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17. Среднегодовая норма внесения составила 200 ± 20 т/га. Минеральные удобрения и известковые материалы на обследуемых полях последние 6 лет не применяли.

Отбор точечных проб агроёма проводили в октябре 2021 г. в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019 тростевым буром на глубину пахотного горизонта. Из точечных проб составляли объединённые пробы массой 500 г. Контрольные пробы (фон) отбирали на участках, покрытых кустарником, не затронутых хозяйственной деятельностью, аналогично отбору проб агроёма. Гранулометрический состав контрольных проб соответствовал гранулометрическому составу экспериментальных проб. Анализ проб выполняли через 7 суток после отбора. Для оценки динамики трансформации химического состава агроёмов использовали результаты обследования соответствующих полей за 2016 и 2018 гг. Отбор и подготовку растительных проб (стеблей кукурузы) проводили согласно ГОСТ Р 58588-2019. Пробы отбирали в 2021 г. в конце вегетационного периода. Индекс аккумуляции (ИА) определяли по отношению концентрации ТМ в воздушно-сухой массе растений к концентрации ПФ соответствующих ТМ в почве [6].

Содержание органического вещества в пробах почвы определяли по ГОСТ 23740-2016 методом прокаливания до постоянной массы; pH_{KCl} – по ГОСТ 26483-85; содержание подвижных соединений фосфора и обменного калия – по ГОСТ Р 54650-2011, обменного кальция – по ГОСТ 26487-8. Определение содержания ТМ в стеблях кукурузы проводили с использованием ГОСТ 30692-2000, в почве – по ФР 1.31.2018.31189 атомно-абсорбционным методом с помощью спектрометра ААС «Спектр-5-4». Статистическую обработку полученных данных выполняли в программе Microsoft Excel по общепринятым методикам. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по t -критерию Стьюдента.

Влияние ЖФ на свойства агроёмов оценивали по следующим показателям: обменная кислотность (pH_{KCl}), содержание органического вещества, подвижных форм фосфора ($P_{2O_{5\text{подв.}}}$), обменного калия ($K_2O_{\text{обм.}}$), ТМ. В перечень определяемых ТМ были включены Fe, Mn, Cu, Zn (используются в составе минеральных добавок для животных) [7], Cd, Pb, Ni (токсичные элементы, в составе минеральных добавок не используются, но содержатся в кормах) [8].

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа отобранных образцов агроёма приведены в таблице 1. Для получения более объективной информации о влиянии ЖФ на свойства агроёмов, в таблице 1 приведены значения показателей, характерные для пахотных земель ЦКО, в пределах которой расположены животноводческие предприятия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что удобрение пашни ЖФ привело к существенному снижению обменной кислотности и повышению содержания подвижного фосфора, обменного калия, органического вещества по сравнению со средними значениями соответствующих показателей, характерными для фоновых территорий и ЦКО. Внесение ЖФ навоза КРС способствовало более значительному повышению pH_{KCl} , чем внесение ЖФ свиного навоза, что может быть обусловлено более высоким содержанием соединений кальция и магния в навозе КРС [12]. Содержание в агроёмах подвижных и валовых форм ТМ по сравнению с фоновыми территориями также изменилось, однако в большинстве случаев находилось в пределах средних значений, характерных для пахотных земель ЦКО.

Внесение ЖФ привело к статистически значимому накоплению в пахотном горизонте валовых форм Cu, Cd, Pb, а также появлению тенденции к накоплению Ni (по сравнению с фоном). Основным источником поступления ТМ в обследуемые агроёмы является навоз, содержащий широкий перечень разнообразных химических элементов, входящих в состав кормов и витаминно-минеральных премиксов [13].

Под влиянием ЖФ содержание подвижной формы (ПФ) Fe в агроёме по сравнению с фоновыми участками уменьшилось в 5–7 раз, а подвижного Mn возросло в 6–11 раз. Существенно увеличилось количество ПФ Cu и Cd. Снижение концентрации подвижного Fe,

Таблица 1 / Table 1

Изменение свойств агрозёма под влиянием жидкой фракции навозных стоков
Changes of the properties of agrozem under the influence of the liquid fraction of manure

Показатель Indicator		Значение показателя / Value of indicator					
		агрозём / agrozem		фон / background		Кировская область* Kirov region*	
		1	2	1	2		
рН _{КСЛ} , ед. рН		5,3±0,2	7,2±0,2	4,0±0,2	4,2±0,2	4,6–5,5	
Органическое вещество, % Organic, %		2,9±0,6	5,4±1,1	2,1±0,4	2,0±0,4	2,1	
мг/кг / mg/kg	P ₂ O ₅	подв. / mobile	980±200	1170±230	94±19	184±37	151–250
	Ca	обменный exchange	7,1±1,1	13,2±2,0	8,2±1,2	10,3±1,5	10,1–15,0
	K ₂ O	обменный exchange	660±100	850±130	122±18	119±18	121–170
	Fe	вал. / total	9300±2400	5900±1500	9200±2300	2600±600	–
		подв. / mobile	18±5	25±6	133±33	122±31	35,7–51,1
	Mn	вал. / total	550±130	500±120	650±150	630±150	430–1500
		подв. / mobile	124±29	116±27	19±4	12,8±2,9	43,2–82,4
	Cu	вал. / total	28±6	19±4	13,9±3,2	10,2±2,3	9,2–37
		подв. / mobile	1,8±0,4	1,19±0,27	0,47±0,11	0,08±0,02	1,6–3,3
	Zn	вал. / total	38±13	17±6	40±13	7,3±2,4	24,8–49,5
		подв. / mobile	8,5±2,8	5,4±1,8	2,8±0,9	4,3±1,4	2,1–5,0
	Cd	вал. / total	0,18±0,05	0,16±0,05	0,038±0,011	0,07±0,02	0,15–0,23
		подв. / mobile	0,026±0,008	0,067±0,020	< 0,01		0,08–0,11
	Pb	вал. / total	6,2±1,5	7,8±2,0	3,2±0,8	2,02±0,25	11,6–14,0
подв. / mobile		1,11±0,28	0,91±0,11	0,66±0,16	1,13±0,14	1,7–1,9	
Ni	вал. / total	23±9	14±6	13±6	11±4	10,2–33,5	
	подв. / mobile	0,76±0,32	0,30±0,10	0,43±0,18	0,46±0,19	0,3–1,1	

Примечание: вал. – валовое содержание; подв. – подвижная форма. * – Характерные значения для центральной части Кировской области [9–11]. Статистически значимые отличия определяемых показателей от соответствующих показателей фоновых территорий (p < 0,05) выделены жирным шрифтом. Отсутствующие в опубликованных источниках данные отмечены прочерком.

Note: total – total content; mobil – movable form. * – Characteristic values for the central part of the Kirov region [9–11]. Statistically significant differences between the determined indicators and the corresponding indicators of the background territories (p < 0.05), are highlighted in bold. Data missing in published sources are marked with a dash.

вероятно, связано с повышением рН и высоким содержанием фосфатов, способствующим образованию малорастворимых соединений железа [14]. Повышение содержания подвижных форм Mn, Cu и Cd в условиях регулярного обогащения почвы органическим веществом ЖФ может быть обусловлено образованием характерных для этих элементов мобильных органоминеральных комплексов [15, 16]. На подвижность Cd существенное влияние могло оказать и высокое содержание обменного калия, способного вытеснять адсорбированные катионы Cd²⁺ с поверхности твёрдой фазы в раствор [17]. Увеличение содержания ПФ Pb и Zn, по сравнению с фоном, наблюдалось в агрозёме 1 (рН_{КСЛ} 5,3). В агрозёме 2 (рН_{КСЛ} 7,2) содержание ПФ этих элементов оказалась несколько ниже, чем в агрозёме 1. Снижение под-

вижности ТМ в нейтральной среде может быть обусловлено образованием малорастворимых фосфатов, карбонатов, оксигидратов и гуматов [18–19]. В отличие от других ТМ, содержание ПФ Cd оказалось несколько выше в агрозёме 2, что может быть обусловлено образованием хорошо растворимых в слабощелочной и нейтральной средах комплексных соединений с органическими веществами и пониженной способностью соответствующих комплексов к иммобилизации за счёт процессов адсорбции [20, 21]. Определённое значение для перевода Cd в подвижную форму может иметь и более высокое содержание в агрозёме 2 обменного Ca, активно конкурирующего с Cd за адсорбционные центры [22].

В таблице 2 приведены результаты обследования полей за 2016 и 2018 гг.

Таблица 2 / Table 2

Динамика изменения химических свойств агрозёма
Dynamics of changes in chemical properties of agrozem

Показатель / Indicator	Значение показателя / Value of indicator				
	агрозём 1 / agrozem 1		агрозём 2 / agrozem 2		
	2016	2018	2016	2018	
pH _{KCl}	4,6±0,1	4,4±0,1	5,7±0,1	6,7±0,1	
Органическое вещество, % / organic, %	2,9±0,6	2,5±0,5	5,4±0,8	5,0±0,7	
P ₂ O ₅ , мг/кг / mg/kg	подв. / mobile	270±50	390±80	360±70	430±90
K ₂ O, мг/кг / mg/kg	обменный / exchange	209±31	242±36	350±60	468±70
Cd, мг/кг / mg/kg	вал. / total	0,12±0,03	0,14±0,04	0,10±0,03	0,12±0,03
Pb, мг/кг / mg/kg	вал. / total	4,6±0,9	5,6±1,1	6,6±1,3	8,8±2,2

Таблица 3 / Table 3

Содержание тяжёлых металлов в средней части стеблей кукурузы
The content of heavy metals in the middle part of corn stalks

Показатель / Indicator	Содержание, мг/кг (на сухое вещество) / Content, mg/kg (per dry matter)		
	агрозём 1 / agrozem 1	агрозём 2 / agrozem 2	обычное содержание в растениях незагрязнённых территорий [10, 23] / normal content in plants of uncontaminated areas [10, 23]
Fe	112±14	81±10	20–80
Mn	210±50	131±30	17–334
Cu	1,18±0,27	0,89±0,20	1–30
Zn	18,4±3,9	9,4±2,0	7–27
Cd	0,14±0,05	0,18±0,06	0,05–0,20
Pb	3,4±1,2	2,1±0,7	1,5–14,0
Ni	4,8±0,7	1,40±0,20	< 9,0

Примечание: жирным шрифтом выделены достоверные отличия (p < 0,05) между вариантами (агрозём 1 и агрозём 2).
Note: Significant differences (p < 0.05) between the variants (agrozem 1 and agrozem 2) are highlighted in bold.

Таблица 4 / Table 4

Индексы аккумуляции тяжёлых металлов в стеблях кукурузы
Indices of accumulation of heavy metals in corn stalks

Элементы / Elements	Индексы аккумуляции / Indices of accumulation	
	агрозём 1 / agrozem 1	агрозём 2 / agrozem 2
Fe	6,1	3,25
Mn	1,69	1,13
Cu	0,65	0,74
Zn	2,17	1,74
Cd	5,4	2,7
Pb	3,1	2,2
Ni	6,3	4,7

Сопоставление данных, приведённых в таблицах 1 и 2, свидетельствует о положительной динамике накопления в агрозёмах, удобряемых ЖФ, подвижных форм калия и фосфора, а также тенденции к повышению содержания валового Cd и Pb. Содержание подвижных форм ТМ в образцах агрозёма, отобранных в разные годы, варьировало в пределах, не превышающих точность используемых методов измерения.

В таблице 3 приведены данные о содержании ТМ в стеблях кукурузы, выращенной на обследуемых полях.

Согласно полученным данным содержание всех ТМ в стеблях кукурузы находилось в пределах обычных значений, характерных для растений, выращиваемых на незагрязнённых территориях, однако при возделывании кукурузы на более кислых почвах прослеживалась некоторая тенденция к повышению содержания ТМ (кроме Cd). Содержание Cd в стеблях растений коррелирует с содержанием ПФ этого элемента в почве, т. е. растения, выращенные на агрозёме 2, характеризовались несколько более высоким содержанием Cd, чем растения

на агрозёме 1 (различие статистически не значимо).

В таблице 4 приведены значения индексов аккумуляции ТМ в стеблях кукурузы.

Приведённые в таблице 4 данные свидетельствуют о более низкой аккумуляции большинства ТМ растениями, выращиваемыми на нейтральных почвах, что может быть обусловлено снижением биодоступности ТМ в нейтральной и слабощелочной среде [24, 25]. Индекс аккумуляции Си оказался более высоким на агрозёме 2. Возможной причиной повышенной биодоступности Си в нейтральных почвах может быть образование растворимых хелатных комплексов. Для катионов Cu^{2+} характерно более высокое сродство к органическим компонентам почвы, чем для других двухвалентных катионов, что и обуславливает особенности транслокации этого элемента в системе почва-растение [26].

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что существующая система использования обезвреженной ЖФ в качестве удобрения для пахотных полей, расположенных в непосредственной близости от прудов-накопителей, может представлять серьёзную опасность для окружающей среды. Систематическое внесение значительных объёмов ЖФ в пашню приводит к существенной трансформации физико-химических свойств агрозёмов. Под влиянием ЖФ в пахотном горизонте значительно повышается содержание подвижных форм фосфора, обменного калия, органических веществ, снижается кислотность, увеличивается валовое содержание и подвижность Си, Cd, Pb. Чрезмерное накопление ПФ фосфора и калия в агроэкосистемах свидетельствует о глубокой трансформации естественных процессов распределения и миграции соответствующих элементов в почве. Для предотвращения деградации пахотных почв вследствие загрязнения отходами животноводства на прилегающих к животноводческим комплексам территориях можно рекомендовать внедрение технологий переработки навоза в пригодные для транспортирования гранулированные формы органических и органоминеральных удобрений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги»,

номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Vasil'ev E.V. Basis of the rational radius of the manure transportation // *Molochnokhozayistvenny vestnik*. 2014. No. 1 (13). P. 49–55 (in Russian).
2. Järvan M., Vettik R., Tamm K. The importance and profitability of farmyard manure application to an organically managed crop rotation // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2017. V. 104. No. 4. P. 321–328. doi: 10.13080/z-a.2017.104.041
3. Pilip L.V., Sychina N.V., Ashikhmina T.Ya. Industrial pig farms as sources of environmental pollution with heavy metals // *Proceedings of the Komi science centre of the Ural division of the Russian Academy of Sciences*. 2021. No. 5 (51). P. 88–91 (in Russian).
4. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Sychina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying manure effluent on its microbiological characteristics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 161–167 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
5. Kumar R.R., Park B.J., Cho J.Y. Application and environmental risks of livestock manure // *Journal of Applied Biological Chemistry*. 2013. No. 56. P. 497–503. doi: 10.1007/s13765-013-3184-8
6. Novotnf J., Seidel H., Kováč G., Babcek R. Bioavailability of trace elements proteinate in pigs // *Medycyna Weterynaryjna*. 2005. V. 61. No. 1. P. 38–42 (in Polish).
7. Hejna M., Moscatelli A., Onelli E., Baldi A., Pilu S., Rossi L. Evaluation of concentration of heavy metals in animal rearing system // *Italian Journal of Animal Science*. 2019. V. 18. No. 1. P. 1372–1384. doi: 10.1080/1828051X.2019.1642806
8. Report on the scientific and production activities of FSBI GCAS Kirovsky for 2017. Kirov: State Center of Agrochemical Service “Kirovskiy”, 2018. 149 p. (in Russian).
9. Shikhova L.N., Egoshina T.L. Heavy metals in soils and plants of the North-East of the European part of Russia. Kirov: Zonalnyy NIISKh Severo-Vostoka, 2004. 264 p. (in Russian).
10. Simonova O.A., Simonov M.V., Tovstik E.V. Content of heavy metals (Zn, Cu, Mn, Fe) in agrosols of a non-chernozem zone of Russia in the conditions of application of mineral fertilizers (on the example of Kirov) // *Ecobiotech*. 2019. V. 2. No. 3. P. 302–306. doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-3-302-306
11. Komyakova Y.M., Antonova O.I. The composition of cattle and swine manure, features of use and prospects for recycling // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. No. 6 (188). P. 63–68 (in Russian).
12. Dacha J., Starmans D. Heavy metals balance in Polish and Dutch agronomy: Actual state and previsions for the future // *Agriculture, Ecosystems & Environ-*

ment. 2005. V. 107. No. 4. P. 309–316. doi: 10.1016/j.agee.2005.02.017

13. Gomonova N.F., Mineev V.G. Iron transformation under the effect of the long-term application of agrochemicals in an agrocenosis // *Eurasian Soil Science*. 2003. V. 36. No. 11. P. 1216–1224.

14. Vasilev A.A., Chashchin A.N. Heavy metals in soils of the city of Chusovoy: assessment and diagnosis of pollution. Perm: Permskaya GSKhA, 2011. 197 p. (in Russian).

15. Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E., Buszewski B. Adsorption and migration of heavy metals in soil // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2001. V. 10. No. 1. P. 1–10.

16. Efremova M.A., Sladkova N.A., Vyalshina A.S. The dynamics of cadmium and potassium accumulation in wheat on soddy-podzolic and lowland peat soils // *Agrohimia*. 2013. No. 11. P. 86–96 (in Russian).

17. Reddy K.J., Wang L., Gloss S.P. Solubility and mobility of copper, zinc and lead in acidic environments // *Plant Soil*. 1995. V. 171. P. 53–58.

18. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. No. 54. P. 8–12. doi: 10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12

19. Singh B.R., Narwal R.P., Jeng A.S., Almas A. Crop uptake and extractability of cadmium in soils naturally high in metals at different pH levels // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1995. V. 26. P. 2123–2142.

20. Plekhanova V.A. Problem of fixing maintenance of cadmium in soil // *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*. 2010. No. 2. P. 55–59 (in Russian).

21. Wang W.Z., Brusseau M.L., Aftioli J.F. The use of calcium to facilitate desorption and removal of cadmium and nickel in subsurface soils // *Journal of Contaminant Hydrology*. 1997. V. 25. No. 3–4. P. 325–336. doi: 10.1016/S0169-7722(96)00046-0

22. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. Heavy metals in ecosystems. Saratov: Rakurs, 2017. 178 p. (in Russian).

23. Sibgatullina M.Sh., Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Valiev V.S. Estimation of the biogeochemical status of herbs and soils in the Volga-Kama reserve // *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya estestvennye nauki*. 2014. V. 156. P. 87–108 (in Russian).

24. Takáč P., Szabová T., Kozáková E., Benková M. Heavy metals and their bioavailability from soils in the long-term polluted Central Spiš region of SR // *Plant Soil Environ*. 2009. V. 55. No. 4. P. 167–172. doi: 10.17221/21/2009-pse

25. Zhang M.K., Liu Z.Y., Wang H. Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2010. V. 41. No. 7. P. 820–831. doi: 10.1080/00103621003592341/

26. Mengel K., Kirkby E.A., Kosegarten H., Appel T. Soil copper // *Principles of Plant Nutrition*. 2001. No. 5. P. 599–611. doi: 10.1007/978-94-010-1009-2

Сезонные изменения концентрации и нетто-обмена CO₂ в экосистеме ельника среднетаёжной подзоны

© 2022. С. В. Загирова, д. б. н., с. н. с., О. А. Михайлов, к. б. н., н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

Проведены измерения концентрации CO₂ в атмосферном воздухе и потоков CO₂ над лесным пологом для количественной оценки экосистемного нетто-обмена (*NEE*) в еловом насаждении в период вегетации 2017 г. В условиях прохладного и дождливого лета скорость нетто-обмена CO₂ между еловым лесом и приземной атмосферой варьировала от -15,0 до 15,0 гCO₂/(м² · сут), кумулятивный *NEE* с мая по август составил -780 гCO₂/м². Во второй половине августа с ухудшением метеоусловий еловый лес становился источником CO₂ в атмосферу. Изменение концентрации CO₂ в столбе воздуха 0–30 м не влияло на суточный баланс экосистемного обмена. Постепенное снижение концентрации CO₂ наблюдали в первой половине вегетационного сезона, минимальные значения отмечены в июле и августе, в период активного фотосинтеза древесных растений. Основным источником CO₂ является почва, поэтому его максимальные концентрации отмечены в припочвенном слое воздуха. Амплитуда сезонных колебаний содержания CO₂ в воздухе на высоте 0,5 м составила 92 ppm, на высоте 2,5 м – 67 ppm, а в кроновом пространстве ельника не превышала 47 ppm. Скорость турбулентного перемешивания воздуха и фотосинтетическая активность лесного полога определяли суточные изменения градиента концентрации по высотному профилю фитоценоза. Снижение содержания CO₂ в столбе воздуха 0–30 м после восхода солнца и до полудня соответствовало повышению нетто-обмена в экосистеме леса. Полученные результаты соответствуют исследованиям обмена CO₂ в лесных экосистемах других климатических зон. Результаты одного года наблюдений свидетельствуют о том, что экосистема елового леса выполняет функцию стока диоксида углерода, однако для оценки межгодовой вариабельности нетто-обмена требуются непрерывные многолетние измерения.

Ключевые слова: ельник, средняя тайга, приземная атмосфера, диоксид углерода, нетто-обмен, метод микро-вихревых пульсаций.

Seasonal variation of concentration and net CO₂ exchange in the spruce forest ecosystem of the middle taiga

© 2022. S. V. Zagirova ORCID: 0000-0002-3304-4160, J. F. Mikhailov ORCID: 0000-0002-6044-6528,
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

Measurements of CO₂ concentration in atmospheric air and CO₂ fluxes over the forest canopy were carried out to quantify ecosystem net exchange (*NEE*) in spruce stands during the growing season of 2017. In the conditions of cool and rainy summer, the rate of net CO₂ exchange between the spruce forest and the surface atmosphere varied from -15.0 to 15.0 gCO₂/(m² · day), the cumulative *NEE* from May to August was -780 gCO₂/m². In the second half of August the spruce forest became a source of CO₂ release into the atmosphere. The change in the CO₂ concentration in the air column was approaching zero and did not affect the accumulation of ecosystem exchange. Measurements at eight heights of spruce stands showed a gradual decrease in CO₂ concentration in the first half of the growing season, the minimum values were noted in July and August, during the period of maximum photosynthesis of forest trees. The main source of CO₂ is soil, respectively, the maximum concentrations are noted in the ground layer of air. The amplitude of seasonal fluctuations in the CO₂ content in the air at a height of 0.5 m was 92 ppm, at 2.5 m – 67 ppm, and in the crown space did not exceed 47 ppm. The rate of turbulent air mixing and photosynthetic activity of the canopy of the stand determined the daily changes in the concentration gradient according to the altitude profile of the phytocenosis. Decrease of CO₂ in the air column 0–30 m after sunrise and before noon corresponded to an increase in net exchange in the ecosystem of forest. The results of one year of observations indicate that the spruce forest ecosystem performs the function of a sink of carbon dioxide, however, to assess the interannual variability of net exchange, continuous long-term measurements are required.

Keywords: spruce forest, middle taiga, surface layer of atmosphere, carbon dioxide net exchange, eddy-covariance.

Лесные экосистемы играют важную роль в поглощении диоксида углерода из атмосферы, леса Европы связывают ежегодно 363 МтС/год [1], леса России – 546 МтС/год [2]. Обмен CO_2 между лесом и атмосферой зависит от многих факторов, в том числе структуры и состояния фитоценозов, экстремальных погодных явлений [3]. По мнению некоторых авторов, изменение углеродного цикла в бореальных лесах европейской части России в последние десятилетия связано с повышением температуры и удлинением вегетационного периода [4]. В свою очередь, потепление глобального климата связано с изменением содержания парниковых газов в атмосфере [5]. Однако вопрос о влиянии повышенного содержания диоксида углерода в атмосферном воздухе на продукцию органического вещества в наземных экосистемах остаётся дискуссионным. Согласно модельным оценкам, в текущем столетии глобальная концентрация CO_2 возрастала ежегодно на 3,3% [6], в связи с этим чистая продукция наземных экосистем с 1995 по 2014 г. увеличилась на 0,23–0,61 гС/(м² · ppm) [7]. Однако экспериментальное обогащение CO_2 атмосферного воздуха в спелых лесных фитоценозах не привело к повышению продукции фитомассы, так как с увеличением gross-фотосинтеза усиливалось и почвенное дыхание [8].

Влияние лесной экосистемы на состав парниковых газов в приземной атмосфере благодаря турбулентным потокам воздуха проявляется на высоте до 1,5 км [9]. Максимальные колебания CO_2 над лесным покровом в Сибири в июле–августе вызваны интенсивными обменными процессами в растениях и почве [10]. В последние десятилетия отмечают усиление амплитуды колебаний концентрации CO_2 в атмосфере северных широт, что по мнению некоторых авторов обусловлено изменением структуры растительного покрова и фотосинтетической продуктивности растений под воздействием климатических факторов [11]. В пространстве лесного фитоценоза варибельность концентрации CO_2 в течение года контролируется температурой и влажностью воздуха [9], а суточные изменения по высотному профилю зависят от скорости турбулентного обмена и фотосинтеза древесного полога [12], и соответственно различаются между типами леса [13]. По мнению некоторых авторов, накопление CO_2 в пространстве лесного фитоценоза в ночные часы может влиять на скорость потоков CO_2 между лесом и атмосферой, поэтому его необходимо учитывать при оценке экосистемного нетто-обмена [12, 14].

Данные о содержании CO_2 в атмосферном воздухе и скорости нетто-обмена парниковых газов в лесных экосистемах Европейского Северо-Востока России единичны. Суточные наблюдения за концентрацией CO_2 по профилю высот в ельнике средней тайги в осенний период выявили максимальную амплитуду колебаний на 10 м, а максимальную концентрацию – в припочвенном слое воздуха [15]. Измерения потоков CO_2 над лесным пологом показали, что экосистема среднетаёжного елового леса в период вегетации выполняет функцию стока CO_2 из атмосферы [16], при этом баланс нетто-обмена за сезон в ельнике значительно выше, чем на мезо-олиготрофном болоте [17]. Цель работы состояла в оценке сезонных изменений концентрации CO_2 в атмосферном воздухе и экосистемного нетто-обмена в ельнике подзоны средней тайги в тёплый период года по результатам измерений методом микровихревых пульсаций.

Объекты и методы исследования

Измерительные системы установлены в еловом фитоценозе на территории Ляльского лесоэкологического стационара Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Республика Коми, 62°16'1,9" с. ш., 50°41'4,5" в. д.). В пределах лесного массива развиваются ельник черничный, ельник разнотравно-черничный, ельник чернично-сфагновый и хвойно-лиственный фитоценоз [15, 18]. В еловых фитоценозах древостои разновозрастные, в их составе преобладает *Picea obovata* Ledeb., в примеси встречаются *Pinus sylvestris* L., *Abies sibirica* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh., *Populus tremula* L. Высота деревьев ели достигает 22 м, их возраст варьирует от 80 до 215 лет, нижняя граница живых ветвей находится на высоте 5–6 м. Подлесок образован растениями *Salix* sp., *Rosa acicularis* Lindl., *Juniperus communis* L., *Sorbus aucuparia* L., средняя высота кустарников – около 1 м.

Нетто-обмен CO_2 экосистемы (*NEE*) соответствует разнице между поглощением CO_2 из атмосферы в процессе фотосинтеза и суммарным дыханием фототрофов и гетеротрофов. Согласно рекомендациям [14], экосистемный обмен CO_2 рассчитывали как сумму потоков CO_2 , измеренных методом микровихревых пульсаций на высоте 30 м (F_{CO_2}), и накопленного CO_2 в столбе воздуха 0–30 м (F_{storage}) за определённый интервал времени. В работе использованы результаты измерений с 1 мая по 31 октября 2017 г. Градиентная система

AP 200 CO₂/H₂O Atmospheric Profile System (Campbell, США) включала воздухозаборники, установленные на восьми высотах от поверхности земли (0,5; 1,5; 2,5; 6; 12; 18; 24 и 30 м), и газоанализатор Li 840 A (Li-Cor Inc., США). Концентрацию CO₂ (C_{CO₂}) в атмосферном воздухе на каждой высоте система регистрировала в ppm (1 ppm = 10⁻⁶ моль CO₂/моль воздуха) с 30-минутным интервалом. Изменение концентрации CO₂ в воздухе рассчитывали в г/(м³·ч) по уравнению:

$$\frac{dc(z)}{dt} = k_z \cdot 10^{-6} \cdot P \cdot M / (RT), \quad (1)$$

где $dc(z)/dt$ – изменение концентрации CO₂ на высоте z , г/(м³·ч); k_z – скорость изменения концентрации CO₂ на высоте z , ppm/ч; P – атмосферное давление, Па; M – молярная масса CO₂, г/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Па·м³/(моль·К); T – температура воздуха, К.

Скорость изменения CO₂ в столбе воздуха 0–30 м соответствовала интегралу скорости изменения его концентрации на соответствующих высотах [14]:

$$F_{\text{storage}} = \int_0^{z_r} \frac{\partial c(z)}{\partial t} dz, \quad (2)$$

где z_r – высота расположения измерительной системы, м.

Суммарное значение F_{storage} со знаком «+» указывало на накопление CO₂, образующегося в процессе дыхания фототрофов и гетеротрофов, а со знаком «-» – на его снижение в результате фотоассимиляции.

Параметры микроклимата (температуру и влажность воздуха, интенсивность фотосинтетически активной радиации, падающей

и отражённой солнечной радиации, атмосферное давление) в ельнике регистрировали автоматической метеостанцией с использованием регистратора CR3000 (Campbell Scientific, США). Система для измерений вертикальных потоков CO₂ (F_{CO₂}) между лесом и атмосферой включала ультразвуковой анемометр (WindMaster, Gill Instruments Limited, США) и инфракрасный газоанализатор закрытого типа (Li-7200, Li-Cor Inc., США). Данные регистрировали с частотой 20 Гц, их обработку производили в программном обеспечении EddyPro (Li-Cor Inc., США) в соответствии с общепринятым методом статистической обработки первичных данных [19], качество обработки оценивали по [20]. Суммарная величина потоков рассчитана как интеграл данных с шагом 30-мин измерений. Значения NEE со знаком «-» соответствовали направленности потока CO₂ из приземной атмосферы в экосистему, а со знаком «+» – потоку из экосистемы в приземную атмосферу.

В 2017 г. прохладная погода с суммой осадков, превышающей средние многолетние значения, сохранялась в течение всего лета (табл. 1). Весной переход к положительным среднесуточным температурам воздуха отмечен в первых числах мая. В мае и июне температура была на 2–5 °С ниже, чем средняя за предыдущие 10 лет. Тёплая погода установилась в июле, однако в конце июля – начале августа отмечено кратковременное понижение среднесуточной температуры до 10 °С. Осенний переход к отрицательным температурам регистрировали в конце октября. Сумма осадков в мае–сентябре составила 405 мм.

Таблица 1 / Table 1

Среднемесячная температура приземного воздуха и сумма осадков в 2017 г.*
Average for the month surface air temperature and sum of precipitation in 2017*

Месяц / Month	Температура, °С Temperature, °C		Осадки, мм/мес. Precipitation, mm/month	
	среднее average	отклонение** deviation	среднее average	отклонение** deviation
Май / May	5,0	-5,4	54,2	8,3
Июнь / June	12,5	-2,3	97,6	25,5
Июль / July	18,3	0,3	79,0	3,0
Август / August	16,0	1,0	83,2	6,2
Сентябрь / September	7,5	-1,6	82,2	13,6
Октябрь / October	2,3	0,44	49,8	-8,7

Примечание: * – по данным Росгидромет для станции Сыктывкар (<http://rp5>), ** – отклонение от среднего за период 2007–2016 гг.

Note: * – according to Roshydromet data for Syktyvkar station (<http://rp5>), ** – deviation from the average for the period 2007–2016.

Результаты и обсуждение

Концентрация CO_2 в атмосферном воздухе елового насаждения характеризовалась вариабельностью во времени и пространстве. Сезонная амплитуда колебаний среднесуточных значений C_{CO_2} на высотах 0,5 м составила 92 ppm, 2,5 м – 67 ppm, 12–30 м не превышала 47 ppm. Разница средних значений концентрации CO_2 за сезон между высотами 0,5 и 30 м соответствовала 24 ppm (рис. 1). В сезонном цикле среднесуточная концентрация CO_2 в столбе воздуха 0–30 м составила в мае 386, июне – 377, июле – 375, августе – 369 ppm, что соответствует сезонному ходу фотосинтеза ели, произрастающей в хвойных насаждениях среднетаёжной подзоны [18].

Градиент концентрации по профилю высот максимально выражен в июле и августе, что обусловлено влиянием двух биотических факторов – фотосинтеза и дыхания (рис. 2), которые, в свою очередь, зависят от радиационного и температурного режимов в экосистеме. В первой половине вегетационного сезона с улучшением свето-температурных условий и повышением фотосинтеза растений наблюдали снижение концентрации CO_2 в кроновом пространстве елового фитоценоза. В этот же период возрастала концентрация CO_2 в припочвенном слое воздуха, как результат влияния температурного фактора на дыхание почв в хвойных фитоценозах [21].

Кратковременное снижение среднесуточной концентрации CO_2 с 450 до 380 ppm на высоте 0,5 м в конце июля–начале августа (рис. 2b) могло быть реакцией почвенной биоты на ухудшение температурного режима. Со снижением функциональной активности живых организмов леса в сентябре–октябре значения C_{CO_2} по профилю высот постепенно выровнялись.

Результаты наблюдений за сезонным режимом CO_2 в еловом фитоценозе средней тайги согласуются с исследованиями в других регионах. Так, в Приенисейской Сибири максимальные концентрации CO_2 над сосновым насаждением ($401,6 \pm 1,5$ ppm) отмечены в декабре–марте, а минимальные ($372,6 \pm 2,4$ ppm) – в конце июля [10]. В Канаде минимальная концентрация CO_2 (около 365 ppm) над еловым лесом отмечена в августе [9].

Амплитуда суточных изменений концентрации CO_2 в атмосферном воздухе елового фитоценоза максимально выражена в летние месяцы, как результат активных обменных процессов в растениях и почве (рис. 3). В июле перед восходом солнца концентрация CO_2 на высотах 30 м достигала 376 ppm, 6 м – 400 ppm, 1,5 м – 450 ppm. После восхода солнца с повышением скорости фотосинтеза и вертикального перемешивания воздуха снижение C_{CO_2} на высоте 2,5 м составило 17 ppm/ч, а 30 м – около 3,5 ppm/ч. В полуденные часы различие концентраций по профилю высот достигало

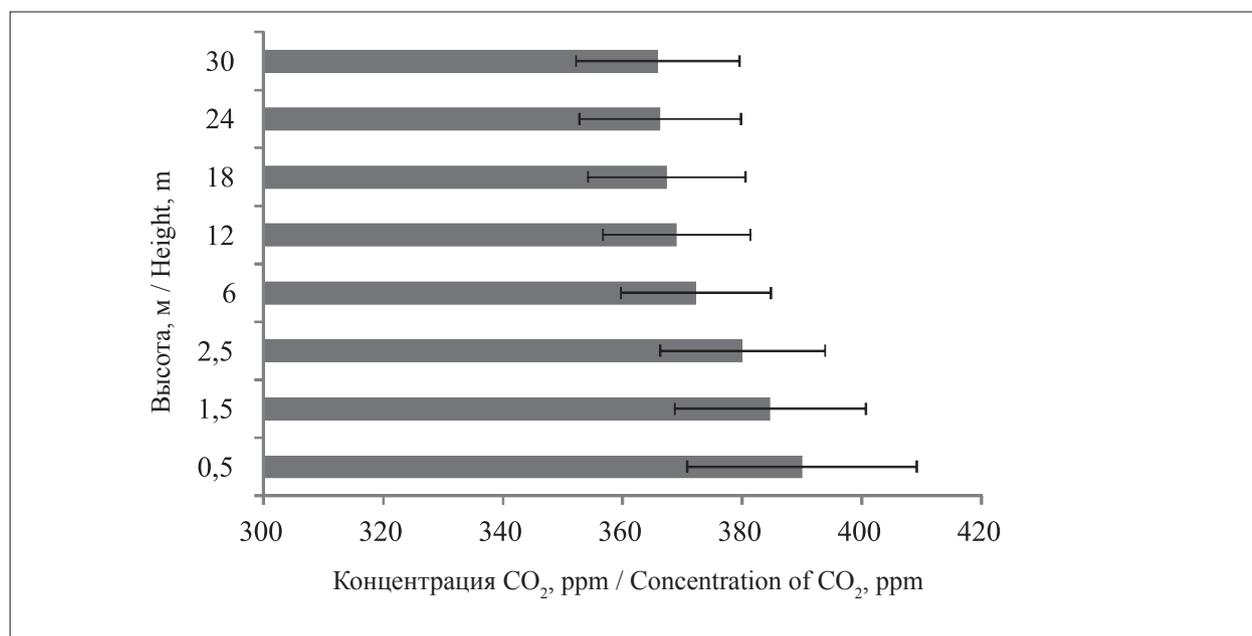


Рис. 1. Концентрация CO_2 в атмосферном воздухе на разных высотах елового фитоценоза. Столбец соответствует среднему значению за период наблюдений, бар – стандартному отклонению
Fig. 1. Concentration of CO_2 in the air of the spruce phytocenosis at different heights. The column corresponds to the mean over the observation period, bar – to the standard deviation

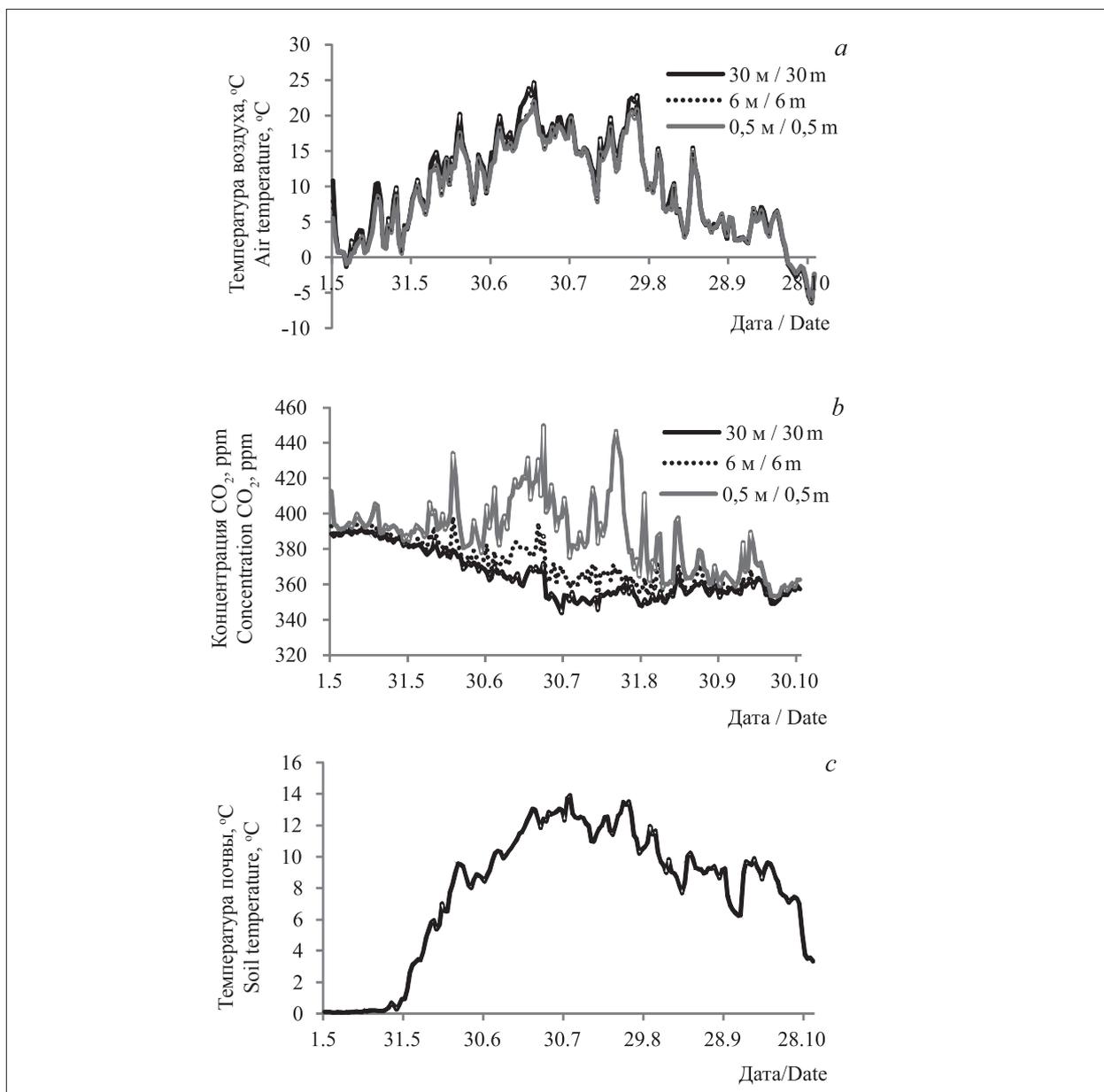


Рис. 2. Сезонный ход среднесуточных значений температуры воздуха (а) и концентрации CO₂ в воздухе (b) на разных высотах, температуры почвы на глубине 10 см (с) в еловом фитоценозе
Fig. 2. Seasonal variation of daily mean values of air temperature (a) and CO₂ concentration in air (b) at different heights, soil temperature at a depth of 10 cm (c) in spruce phytocenosis

минимума. Вечерние и ночные часы скорость повышения содержания CO₂ в кроновом пространстве и припочвенном слое воздуха составила 4,8 ppm/ч и 7,2 ppm/ч соответственно. Формирование градиента концентрации по высотному профилю в ночные часы обусловлено низким турбулентным обменом воздуха при стабильной инверсии температуры.

В течение суток разница концентрации CO₂ между высотами 0,5 и 30 м в среднем достигала в июне 134 ppm, в июле – 247 ppm, в августе – 192 ppm, в сентябре снижалась до 109 ppm. Согласно исследованиям других

авторов, в ельнике средней тайги в октябре средняя за сутки величина C_{CO₂} у поверхности почвы составляла 403 ppm, на верхней границе полога – 346 ppm, разница составила 57 ppm [15]. В хвойных лесах Ленинградской области в летний период разность содержания CO₂ над поверхностью почвы и в кронах деревьев в вечерние часы соответствовала 150–200 ppm, а в лиственных – 300 ppm [13].

В целом полученные данные о суточной динамике концентрации CO₂ в атмосферном воздухе елового фитоценоза согласуются с результатами исследований других авто-

ров, однако отмечены различия в амплитуде колебаний этих значений. Так, на обсерватории «ЗОТТО» в старовозрастном сосняке лишайниковом в июле суточные изменения концентрации CO_2 на высоте 4 м составили 20,5 ppm, постепенно сокращаясь до 4,8 ppm на 52 м [10]. В исследованном нами еловом насаждении европейской тайги в слое воздуха 18–30 м амплитуда колебаний C_{CO_2} достигала 30 ppm, а на высоте 2,5 м – 70 ppm. Различия в режиме CO_2 в этих фитоценозах могли быть обусловлены, прежде всего, структурой и продуктивностью лесных фитоценозов [13].

Согласно исследованиям некоторых авторов, в ночные часы при отсутствии фотосинтеза и низкой турбулентности в лесном фитоценозе CO_2 накапливается в столбе атмосферного воздуха, скорость изменения (F_{storage}) составляет около 20% мгновенных значений нетто-обмена (NEE) [12]. В сосновом лесу Канады в тёплый период года значения F_{storage} варьировали от $-0,6$ до $0,6 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, в среднем за сезон составили $-0,031 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ и незначительно влияли на экосистемный обмен CO_2 [14]. Отрицательные значения этого показателя в дневные часы указывали на поглощение CO_2 фитоценозом. Сходные результаты получены нами при изучении режима CO_2 в ельнике среднетаёжной подзоны. Суточные изменения содержания CO_2 в столбе воздуха 0–30 м хорошо выражены в июле и августе (рис. 4). После восхода солнца и до полудня F_{storage} имел отрицательные значения, а в вечерние часы со снижением фотосинтеза и турбулентного перемешивания воздуха наметилась тенденция накопления

CO_2 , которая продолжалась ночью. В результате за сутки баланс F_{storage} приблизился к нулю, а кумулятивные значения NEE и F_{CO_2} оказались равными (рис. 4). Таким образом, при оценке суммарного экосистемного обмена CO_2 в ельнике можно пренебречь изменением концентрации CO_2 в столбе воздуха 0–30 м и характеризовать суточный и сезонный баланс NEE по скорости потока CO_2 между лесом и приземной атмосферой (F_{CO_2}), измеренной пульсационным методом.

Ранее нами показано, что изменение нетто-обмена CO_2 в ельнике зависит от фотосинтетически активной радиации [16], поэтому максимальные значения NEE при благоприятных погодных условиях 2017 г. наблюдали в полуденные часы (рис. 4). В мае – августе значения нетто-обмена CO_2 варьировали в пределах от $-15,0$ до $15,0 \text{ гСO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, что соответствует $-5,0$ – $5,0 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, и в среднем составило $-6,4 \text{ гСO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ (или $-2,1 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) (рис. 5). Полученная оценка NEE согласуется с исследованиями режима CO_2 в ельниках других регионов. В тёмнохвойных насаждениях Сибири экосистемный обмен CO_2 в период вегетации менялся от -6 до $2 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ [21]. В ельниках чернично-сфагновом и сложном на южной границе европейской тайги суточный NEE варьировал в пределах от -8 до $8 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ [22]. Менее интенсивный нетто-обмен CO_2 установлен в сосняках кустарничково-лишайниковых в Канаде (от $-4,0$ до $2,0 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [14] и на европейском Северо-Востоке России (от $-4,0$ до $1,0 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) [24].

Вегетационный сезон 2017 г. отличался прохладной и дождливой погодой, в свя-

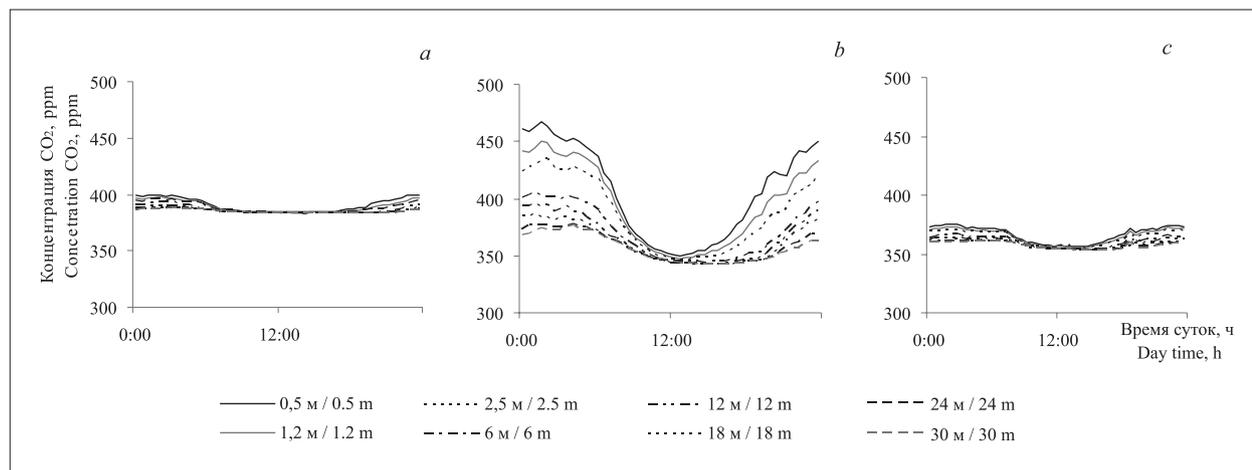


Рис. 3. Суточный ход концентрации CO_2 в мае (a), июле (b) и сентябре (c) на разных высотах в еловом фитоценозе
 Fig. 3. Diurnal variation of CO_2 concentration in May (a), July (b) and September (c) at different heights of the spruce phytocenosis

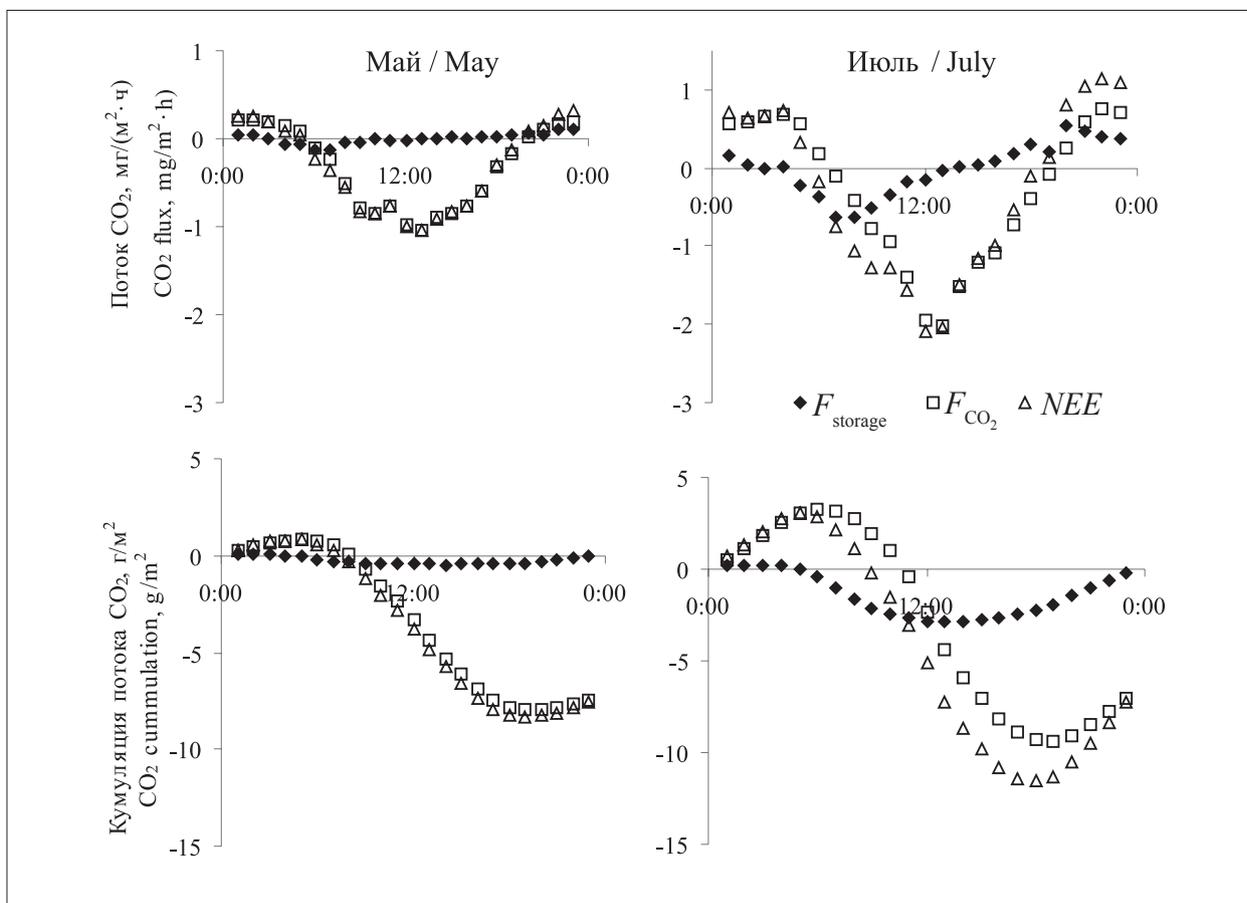


Рис. 4. Суточный ход обмена CO_2 в еловом насаждении в мае и июле. F_{storage} – накопление CO_2 в столбе воздуха 0–30 м; F_{CO_2} – поток CO_2 над пологом древостоя; NEE – экосистемный нетто-обмен CO_2 . Точки соответствуют средним значениям за месяц

Fig. 4. Diurnal variation of CO_2 exchange in spruce forest in May and July. F_{storage} – storage of CO_2 in the air column 0–30 m; F_{CO_2} – CO_2 flux over the canopy; NEE – ecosystem CO_2 net exchange. The points correspond to the average values for the month

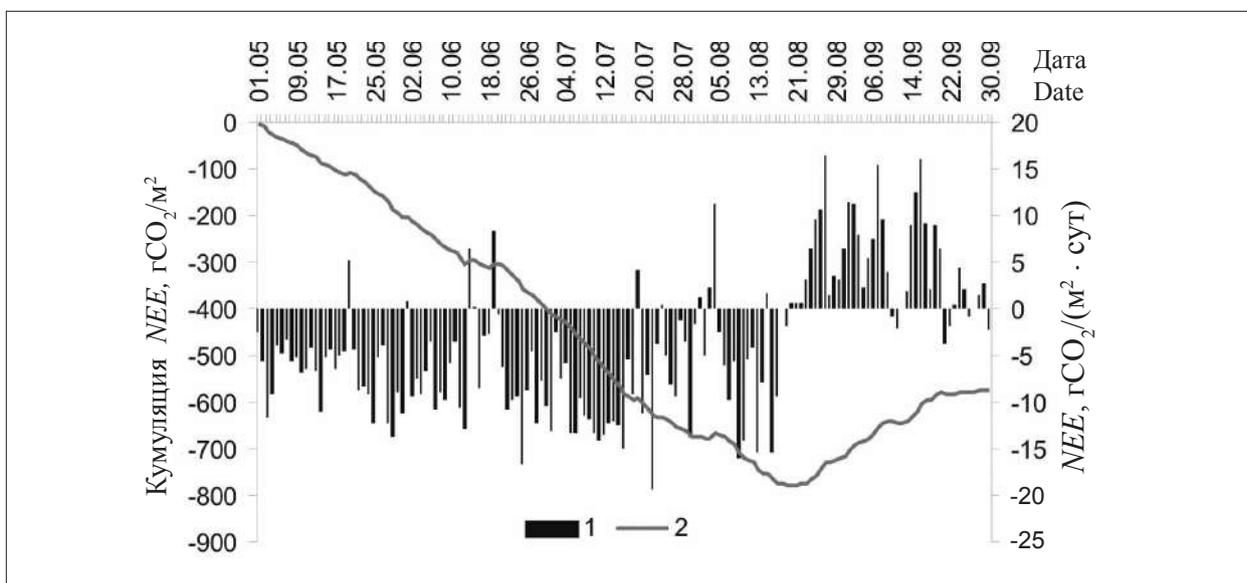


Рис. 5. Сезонный ход нетто-обмена CO_2 (1) и кумуляция нетто-обмена CO_2 (2) в экосистеме ельника в мае–сентябре

Fig. 5. Seasonal variation of CO_2 net exchange (1) and cumulation of CO_2 net exchange (2) in spruce forest in May–September

зи с этим уже во второй половине августа менялось направление суточного потока CO_2 между лесом и приземной атмосферой, еловый лес становился источником CO_2 . Кумулятивный нетто-обмен ельника с 1 мая по 20 августа составил $-780 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, а за май–сентябрь – $570 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, что значительно ниже результатов, полученных в этом же фитоценозе при более благоприятных метеорологических условиях 2013 г. [16]. В целом баланс *NEE* в лесных экосистемах варьирует в широких пределах и составляет для хвойных лесов бореальной зоны от -206 до $95 \text{ гC}/(\text{м} \cdot \text{год})$ в зависимости от климатических условий [25]. Снижение стока CO_2 в экосистеме елового насаждения в 2017 г. подтверждает мнение этих авторов, что температура и влажность регулируют межгодовую вариабельность экосистемного обмена CO_2 .

Заключение

Метод микровихревых пульсаций использован для оценки потоков CO_2 между еловым лесом и приземной атмосферой в 2017 г. Нетто-обмен повышался в первой половине вегетационного сезона, суммарный *NEE* в мае–августе соответствовал $-780 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$, а к концу сентября снизился до $-570 \text{ г CO}_2/\text{м}^2$. Невысокие значения кумуляции *NEE* за период наблюдений обусловлены прохладной и дождливой погодой. Суточные изменения концентрации CO_2 в столбе воздуха (F_{storage}) близки к нулю, поэтому не влияли на баланс экосистемного обмена. Измерения на восьми высотах елового фитоценоза показали постепенное снижение концентрации CO_2 в первой половине вегетационного сезона, минимальные значения отмечены в июле и августе, в период активного нетто-обмена между лесом и приземной атмосферой. Турбулентное перемешивание воздуха и фотосинтез определяли суточные изменения градиента концентрации по высотному профилю фитоценоза. Амплитуда суточных колебаний концентрации CO_2 под пологом древостоя в 1,5–2 раза выше, чем в кроновом пространстве. Отрицательные значения F_{storage} в столбе воздуха 0–30 м после восхода солнца и до полудня соответствовали активному нетто-обмену в экосистеме. Результаты наблюдений в период вегетации за один год позволили оценить сток CO_2 из атмосферы в лесную экосистему, для выявления межгодовой вариабельности этого показателя необходимо продолжить ряд непрерывных измерений.

Работа выполнена в рамках темы НИР «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России», рег. № 1021051101417-8-1.6.19.

References

- Janssens I., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.-J., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.-D., Valentini R., Dolman A.J. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7–12% of European anthropogenic CO_2 emissions // *Science*. 2003. V. 300. P. 1538–1542. doi: 10.1126/science.1083592
- Shvidenko A.Z., Shepachenko D.G. Russian forest carbon budget // *Sibirskiy lesnoy zhurnal*. 2014. No. 1. P. 69–92 (in Russian).
- Foken T., Babel W., Munger J.W., Grnholm T., Vesala T., Knohl A. Selected breakpoints of net forest carbon uptake at four eddy-covariance sites // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2021. V. 73. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1080/16000889.2021.1915648
- Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Nilsson S., Aiyyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Global Change Biology*. 2005. V. 11. P. 2090–2102. doi: j.1365-2486.2005.01069
- Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223.
- Ainsworth E.A., Lemonnier P., Wedow J.M. The influence of rising tropospheric carbon dioxide and ozone on plant productivity // *Plant Biology*. 2020. V. 22 (Suppl. 1) P. 5–11. doi: 10.1111/plb.12973
- Fernández-Martínez M., Sardans J., Chevallier F., Ciais P., Obersteiner M., Vicca S., Canadell J.G., Bastos A., Friedlingstein P., Sitch S., Piao S.L., Janssens I.A., Peñuelas J. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO_2 and temperature // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9. P. 73–79. doi: 10.1038/s41558-018-0367-7
- Jiang M., Medlyn B.E., Drake J.E., Duursma R.A., Anderson I.C., Barton C.V.M., Boer M.M., Carrillo Y., Castañeda-Gómez L., Collins L., Crous K.Y., De Kauwe M.G., Dos Santos B.M., Emmerson K.M., Facey S.L., Gherlenda A.N., Gimeno T.E., Hasegawa S., Johnson S.N., Kännaste A., Macdonald C.A., Mahmud K., Moore B.D., Nazaries L., Neilson E.H.J., Nielsen U.N., Niinemets Ü., Noh N.J., Ochoa-Hueso R., Pathare V.S., Pendall E., Pihlblad J., Piñeiro J., Powell J.R., Power S.A., Reich P.B., Renchon A.A., Riegler M., Rinnan R., Rymer P.D., Salomón R.L., Singh B.K., Smith B., Tjoelker M.G., Walker J.K.M., Wujeska-Klaue A., Yang J., Zaehle S., Ellsworth D.S. The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment // *Nature*. 2020. V. 580. P. 227–231. doi: 10.1038/s41586-020-2128-9

9. Chen B., Chen J.M., Worthy D.E.R. Intrannual variability in the atmospheric CO₂ rectification over a boreal forest region // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. Article No. D16301. doi: 10.1029/2004JD005546
10. Timokhina A.V., Prokushkin A.S., Onuchin A.A., Panov A.V., Kofman G.B., Khaymann M. Variability of Ground CO₂ Concentration in the Middle Taiga Subzone of the Yenisei Region of Siberia // *Russian Journal of Ecology*. 2015. V. 46. No. 2. P. 142–151. doi: 10.1134/S1067413615020125
11. Forkel M., Carvalhais N., Rödenbeck C., Keeling R. Heimann M., Thonicke K., Zaehle S., Reichstein M. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems // *Science*. 2016. V. 351. P. 396–399. doi: 10.1126/science.aac4971
12. Yang P.C., Black T.A., Neumann H.H., Novak M.D., Blanken P.D. Spatial and temporal variability of CO₂ concentration and flux in a boreal aspen forest // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104. No. D22. P. 27653–27661.
13. Kobak K.I. Biotic components of the carbon cycle Bioticheskie komponenty uglerodnogotsikla. Leningrad: Gidrometizdat, 1988. 247 p. (in Russian).
14. Baldocchi D., Vogel C.A., Holl B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below Jack pine forest // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1997. V. 83. P. 147–170.
15. Bioproduction process in forest ecosystems of the North. Sankt-Peterburg: Nauka, 2011. 278 p. (in Russian).
16. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Elsakov V.V. Carbon dioxide and water exchange between spruce forest and atmosphere in spring-summer under different weather conditions // *Contemporary Problems Ecology*. 2019. V. 12. P. 45–58. doi: 10.1134/S1995425519010116
17. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Schneider Ju. Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 12–20. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-012-020
18. Indigenous spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions / Eds. K.S. Bobkova, E.P. Galenko. Sankt-Peterburg: Nauka, 2006. 337 p. (in Russian).
19. Vickers D., Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data // *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 1997. V. 14. P. 512–526.
20. Mauder M., Foken T. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure // *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. V. 15. No. 6. P. 597–609.
21. Mashika A.V. Emission of carbon dioxide from the surface of podzolic soil // *Pochvovedenie*. 2006. No. 12. P. 1457–1464 (in Russian).
22. Röser C., Montagnani L., Schulze E.-D., Mollicone D., Kolle O., Meroni M., Papale D., Marchesini L.B., Federici S., Valentini R. Net CO₂ exchange rates in three different successional stages of “dark taiga” of Central Siberia // *Tellus*. 2002. No. 54B. P. 642–654.
23. Olchev A.V., Kurbatova Yu.A., Tatarinov F.A., Molchanov A.G., Varlagin A.V., Gorshkov I.I., Vygodskaya N.N. Assessment of the primary gross and net productivity of spruce forests in the Central European part of Russia using field measurements and a mathematical model // *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2009. V. 129. No. 6. P. 565–578 (in Russian).
24. Zagirova S.V., Mikhailov O.A. **Ecosystem exchange of carbon dioxide and water in cowberry–lichen pine forest in the Middle Taiga Subzone of Eastern Europe** // *Russian Journal of Ecology*. 2021. V. 52. No. 3. P. 201–211. doi: 10.1134/S1067413621030103
25. Baldocchi D., Chu H., Reichstein M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 249. P. 520–533. doi: 10.1016/agroformet.2017.05.015

Подход к разработке интегрального индекса экологического благополучия территории

© 2022. А. В. Минкина¹, аспирант,

С. А. Двинских¹, д. г. н., профессор, Т. В. Зуева², к. м. н., доцент,

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15,

²Пермский государственный университет имени Академика Е. А. Вагнера, 614000, Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 26,
e-mail: anutik.08@inbox.ru, dvins@mail.ru, zueva48@mail.ru

Ухудшение экологического состояния всех природных компонентов на территории Пермского края связано с интенсивным техногенным воздействием на окружающую среду и ростом заболеваемости населения. В настоящее время в практике природопользования отсутствует единый, общепринятый метод интегральной оценки, как экологического состояния (ЭС) территорий, так и социальных условий жизни населения. Большая часть существующих показателей (индексов) рассматривает лишь отдельные составляющие общего ЭС и обычно опирается на данные мониторинга. Мы считаем, что для большого региона (например, для Пермского края) за основу оценки ЭС территории целесообразно принимать техногенное воздействие с обязательным учётом последствий этого воздействия на здоровье населения. Для оценки ЭС территории предлагается использовать интегральный индекс экологического благополучия территории (ИЭБ). Представлены этапы разработки ИЭБ, предложена методика оценки ЭС территории, оценки социальных условий жизни и заболеваемости населения. Впервые в качестве оценочного критерия использована условная норма – величина 50% обеспеченности выбранных расчётных показателей. Приведены основные результаты использования методики на примере административно-территориальных единиц Пермского края.

Ключевые слова: Пермский край, экологическое состояние, индекс экологического благополучия, социальные условия, заболеваемость населения, оценка состояния территории.

An approach to the development of an integral index of ecological well-being of the territory

© 2022. A. V. Minkina¹ ORCID: 0000-0002-4762-3761²

S. A. Dvinskikh¹ ORCID: 0000-0002-8443-8100², T. V. Zueva² ORCID: 0000-0002-2865-0748²

¹Perm State University,

15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068,

²E. A. Vagner Perm State Medical University,

26, Petropavlovskaya St., Perm, Russia, 614000,

e-mail: anutik.08@inbox.ru, dvins@mail.ru, zueva48@mail.ru

The deterioration of the ecological state of all natural components in the territory of the Perm Krai is associated with an intense technogenic impact on the environment and an increase in the incidence of the population. Currently, in the practice of nature management there is no single, generally accepted method of integral assessment of both the ecological state of territories and the social conditions of life of the population. Most of the existing indicators (indices) consider only individual components of the general ecological state and are usually based on monitoring data. We believe that for a large region (for example, for the Perm Krai), it is advisable to take the technogenic impact as the basis for assessing the ecological state of the territory, with the obligatory consideration of the consequences of this impact on public health. To assess the ecological state of the territory, it is proposed to use the integral index of the ecological well-being of the territory. The stages of development of the integrated index of the ecological well-being of the territory are presented, the methodology for assessing the ecological state of the territory, assessing the social conditions of life and the incidence of the population is proposed. For the first time, a conditional norm was used as an evaluation criterion – the value of 50% probability of exceeding the selected calculated indicators. The main results of using the methodology are given on the example of the administrative-territorial units of the Perm Krai are presented.

Keywords: Perm Krai, ecological state, index of ecological well-being, social conditions, morbidity of the population, assessment of the state of the territory.

Экологические проблемы Пермского края связаны с разнообразными техногенными воздействиями на окружающую среду (ОС). Развитие нефтеперерабатывающей, химической, металлургической, машиностроительной, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей промышленности и агропромышленного комплекса обусловило химическое загрязнение природных компонентов, деградацию лесных массивов, активизацию экзогенных процессов и накопление промышленных и бытовых отходов. В ряде районов края сформировались техногенные аномалии. При этом административные территории отличаются друг от друга видами и интенсивностью проявления экологических проблем, которые наравне с социальными условиями оказывают влияние на здоровье населения. Вследствие этого возникает необходимость получения объективной оценки экологического состояния (ЭС) и выявление первоочередных природоохранных проблем не только в целом по краю, но и по отдельным его территориям.

В настоящее время в России и за рубежом существуют различные критерии (показатели, индексы, коэффициенты и пр.) и методы, используемые для оценки ЭС территорий. Учёными Йельского университета предложен всемирно известный «индекс экологической эффективности» (EPI – Environmental Performance Index) [1]. Получил известность и такой показатель, как «экологический след» (The Ecological Foot-print) [2, 3], возникла даже Глобальная сеть экологического следа, которая ежегодно рассчитывает показатель, оценивающий степень воздействия человека на ОС. Предложен «индекс устойчивого развития окружающей среды» (Environmental sustainability index) [4]. Учёными Колумбийского университета разработан «индекс удовлетворительного состояния ОС» (Ecosystem Wellbeing index), учитывающий 51 показатель, отражающий состояние почв, качество и доступность водных ресурсов, чистоту воздуха и другие критерии. Предложены оценка ЭС территории Республики Беларусь, основывающаяся на учёте источников загрязнения и концентрациях загрязняющих веществ [5], и интегральный индекс устойчивого развития регионов республики [6]. В России создана многофункциональная экологическая карта Москвы (Компания Eco Standard group), основанная на данных экологического мониторинга [7, 8]. Применительно к региональным единицам республики Марий Эл предложен «интегральный инди-

катор качества окружающей среды и степени экологической устойчивости региона» [9]. В Татарстане разработан «интегральный показатель качества среды обитания территории» (KSOT) [10]. Для малых и средних городов севера Московской области приведена методика оценки ЭС компонентов ОС [11]. Перечисленные показатели – это далеко не полный перечень существующих способов оценки ЭС территории.

Однако единый общепринятый метод интегральной оценки ЭС территорий в настоящее время отсутствует, а существующие методы не уделяют должного внимания социальной составляющей в оценке качества ОС.

Цель работы – разработка интегрального индекса экологического благополучия (ИЭБ) территории и методологического подхода к его расчёту (на примере Пермского края).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является комплекс статистических данных, включающий сведения по техногенным воздействиям и заболеваемости населения в административно-территориальных единицах (АТЕ) Пермского края за период с 2000 по 2018 гг. В ходе исследований были использованы статистические методы (в том числе ранговой корреляции Спирмена), метод водохозяйственного баланса, метод линейной интерполяции, медико-статистический анализ, метод картографирования, а также программа для расчёта статистических характеристик StokStat 1.2 и ГИС-технологии (ArcGis и AutoCad). Поиск и отбор информации осуществляли в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics), eLIBRARY.RU. Поиск информации проводили в поисковых системах Yandex и Google по поисковым запросам: «загрязнение окружающей среды», «экологическое состояние», «заболеваемость», «экология регионов», «экологический индекс».

Результаты и обсуждение

Экологическое состояние любой территории представляет синтез состояний природных компонентов (атмосферы, воды, почвы и растительности), каждый из которых находится под воздействием природных и техногенных факторов. Результат их взаимодействия может быть охарактеризован индексом экологического благополучия – ИЭБ [12, 13].

Под экологическим благополучием мы понимаем такое состояние территории, при котором удовлетворяются все физиологические, экономические и медико-социальные потребности населения, обеспечивается здоровье населения, при этом отсутствует или минимизировано негативное воздействие на природную среду. Индекс экологического благополучия – сложный показатель. Он состоит из частных индексов, характеризующих интенсивность воздействий на отдельные природные компоненты, которые, в свою очередь, определяются через относительные коэффициенты – K , показывающие воздействие какого-либо фактора на один компонент природной среды.

Расчёт ИЭБ включает несколько этапов и подробно изложен в [12]. Первый этап – выбор расчётных показателей: норма стока и объёмы сбросов сточных вод; объёмы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных и передвижных источников; объёмы образования отходов, содержание гумуса в почвах, доля кислых почв, площади водной и ветровой эрозии и густота оврагов, лесистость территории.

Второй этап – определение условной нормы воздействия. В качестве такого критерия предлагаем использовать «условную норму», соответствующую 50% обеспеченности показателя техногенного воздействия по краю [14].

Третий этап – расчёт относительных коэффициентов для выбранных расчётных показателей. Относительный коэффициент определяли по формуле (1), если с его увеличением растёт положительная роль в формировании природного компонента (например, водообеспеченность):

$$K_i = \frac{K_n}{K_\phi} \quad (1)$$

В противном случае (например, выбросы в атмосферу) расчёт вели по формуле (2):

$$K_i = \frac{K_\phi}{K_n} \quad (2)$$

где K_ϕ – фактическое значение анализируемого показателя в i -й АТЕ; K_n – его условная норма (критерий), соответствующая его 50% обеспеченности по региону.

Четвёртый этап – расчёт частных индексов природных сред для изучаемой территории, проводится по формуле (3):

$$I_{zi} = (K_1 + K_2 + \dots K_n) / m, \quad (3)$$

где I_{zi} – частный индекс природной среды; z – природный компонент; i – АТЕ; K_1, K_2, K_n – относительные коэффициенты, m – количество слагаемых.

Пятый этап – расчёт интегрального ИЭБ. Индекс экологического благополучия определялся как среднее геометрическое между частными индексами природных компонентов:

$$I_i = \sqrt[4]{I_{\text{вод.}} \cdot I_{\text{возд.}} \cdot I_{\text{почв.}} \cdot I_{\text{лес.}}} \quad (4)$$

где I – ИЭБ в i -том АТЕ; $I_{\text{вод.}}, I_{\text{возд.}}, I_{\text{почв.}}, I_{\text{лес.}}$ – частные индексы природных компонентов.

Последний этап – оценка экологического состояния АТЕ по ИЭБ – проводится в соответствии с разработанными нами качественными и количественными критериями по пятибалльной шкале: благоприятное состояние (1,0–1,5 балла), допустимое (1,51–2,0 балла), удовлетворительное (условная норма) (2,01–2,5 балла), напряжённое (2,51–4,0 балла), кризисное (более 4,01 баллов).

Эти критерии были положены в основу построения карты «Оценка экологического состояния Пермского края» (рис. 1, см. цв. вкладку VII).

Оценку социальных условий и заболеваемости населения проводили по частным индексам ($ЧИ_{\text{соц.}}$ и $ЧИ_{\text{заб.}}$). При исследованиях социальных условий использовали следующие показатели: обеспеченность жилищного фонда и средний уровень заработной платы; обеспеченность врачами и средним медперсоналом, плотность населения. Здоровье населения оценивали по показателям общей заболеваемости и экологически значимой заболеваемости по различным нозологическим формам. Результаты расчётов отражены на картах: «Состояние социальных условий жизни населения» и «Распределение общей заболеваемости населения» (рис. 2, рис. 3, см. цв. вкладку VIII).

Анализ построенных карт (рис. 1–3) показал, что в кризисном состоянии находятся города Березники и Соликамск, причём в г. Березники в кризисном состоянии находится большинство компонентов природной среды (кроме лесной растительности); в г. Соликамск – водные и почвенные ресурсы, состояние остальных компонентов оценивается как напряжённое. Напряжённое ЭС отмечалось как в регионах с высокой степенью техногенной нагрузки, так и в регионах, имеющих невысокие показатели обеспеченности водными ресурсами и лесистости. Это промышленно развитые террито-

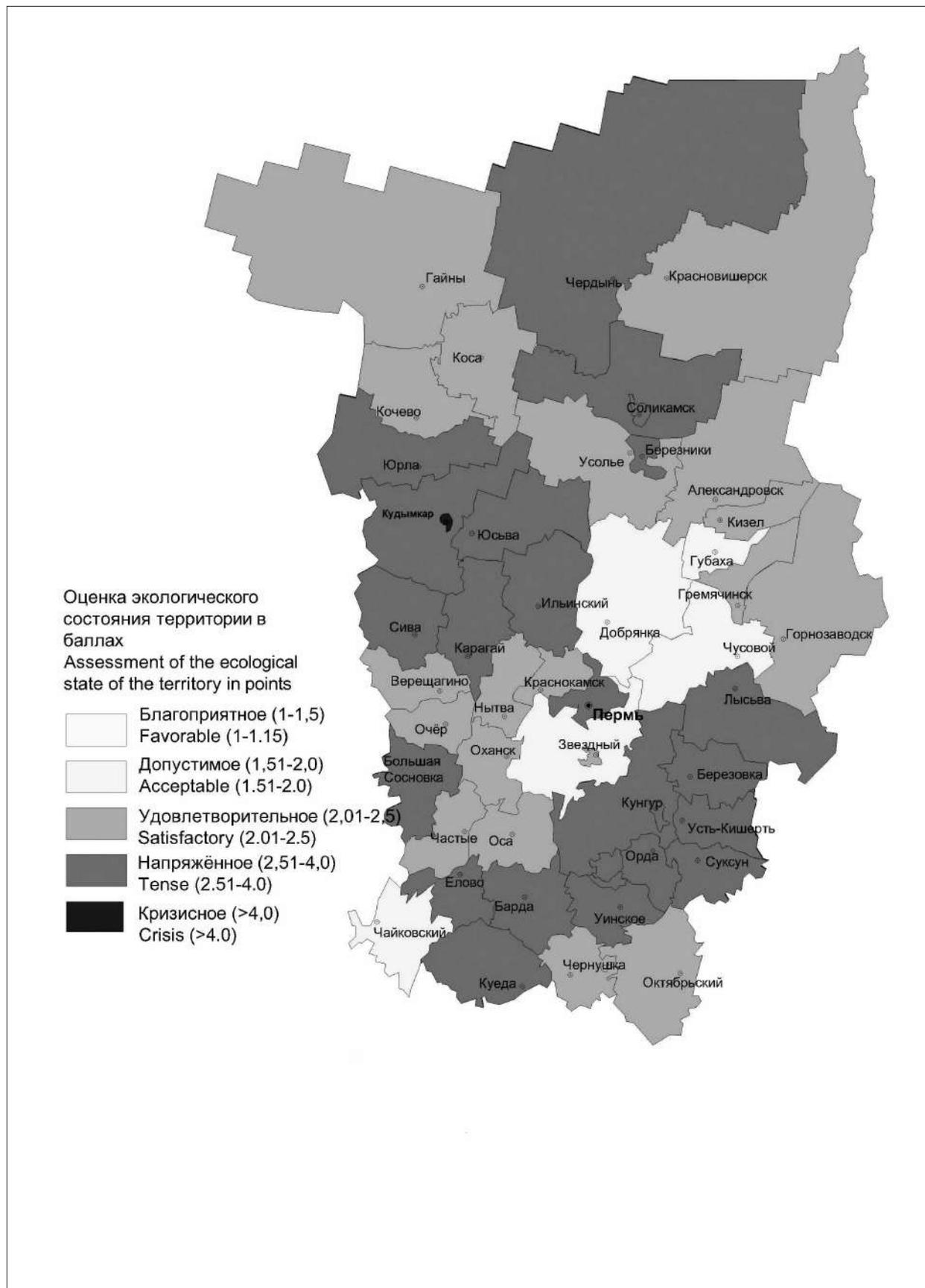


Рис. 2. Состояние социальных условий жизни населения Пермского края
Fig. 2. The state of the social conditions of the Perm Krai

рии: г. Пермь, районы Чусовской, Пермский, Добрянский, Краснокамский, Чернушинский и др. (рис. 2).

Обеспечение социальными условиями на уровне «кризисное» и «напряжённое» сложилось в 21 АТЕ (Кудымкар, Пермь, Соликамск, Юрлинский, Сивинский, Юсвинский, Куединский, Бардымский и другие районы) (рис. 3). Оно объясняется нехваткой медицинских кадров (менее 8 врачей и 64 единиц среднего медицинского персонала), недостаточной обеспеченностью жильём (менее 134,6 тыс. м²) и низким значением среднего уровня заработной платы (менее 10933,7 руб.).

Напряжённое состояние по общей заболеваемости взрослого населения отмечается в 19,2% АТЕ края, допустимое и благоприятное – в 80,2%; детского населения (0–14 лет) – соответственно в 29,8 и 58,4% АТЕ. В группе детского населения в возрасте от 0 до 1 года, являющегося наиболее чувствительным из группы риска, напряжённое состояние по общей заболеваемости отмечается в 34,0%, удовлетворительное – в 25,5%, допустимое и благоприятное – в 40,5% АТЕ. Учитывая, что уровень общей заболеваемости детского населения превышает уровень заболеваемости взрослого в 1,6 раза, а детей до 1 года – в 2,5 раза, проведён анализ заболеваемости детей до 1 года наиболее распространёнными нозологическими формами болезней (болезни крови и кроветворных органов, включая ане-

мии, болезни органов дыхания и врождённые аномалии). Установлено, что по болезням крови и кроветворных органов, в том числе анемиям, а также по болезням органов дыхания напряжённое состояние складывается в 38% АТЕ; по классу болезней «врождённые аномалии, деформации и хромосомные нарушения» – напряжённое и кризисное состояние отмечается в 19,1% территорий.

Корреляционный анализ показал, что имеется высокая связь между ИЭБ и показателями общей заболеваемости у взрослого и детского населения в возрасте от 0 до 14 лет ($r_s = 0,72-0,79, p = 0,95$) и заметная ($r_s = 0,63-0,67, p = 0,95$) – у детей первого года жизни, включая показатели заболеваемости такими экологически значимыми болезнями, как болезни крови и кроветворных органов, в том числе анемии, болезни органов дыхания и врождённые аномалии. Роль социальных условий в формировании общей заболеваемости высокая и у взрослого населения, и у детей ($r_s = 0,88-0,89, p = 0,95$). На заболеваемость разных групп населения (кроме детей первого года жизни) в равной степени влияют экологические и социальные условия, а у детей первого года жизни большую роль играют социальные условия ($r_s = 0,86-0,89, p = 0,95$) (табл.).

Таким образом, в Пермском крае в формировании здоровья взрослого и детского населения практически в равной степени

Таблица / Table
Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (r_s) между социальными условиями, ИЭБ и показателями заболеваемости населения
Spearman's rank correlation coefficients (r_s) between social conditions, EBI and population morbidity rates

Показатели общей заболеваемости Indicators of general morbidity	Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена (r_s) Spearman's rank correlation coefficients (r_s)	
	ИЭБ EWI	социальные условия social conditions
Общая заболеваемость взрослого населения General morbidity of the adult population	0,76±0,10	0,88±0,07
Общая заболеваемость детей (0–14 лет) General morbidity of children (0–14 years old)	0,72±0,10	0,80±0,07
Общая заболеваемость подростков General morbidity of adolescents	0,79±0,09	0,89±0,07
Общая заболеваемость детей до года General morbidity of children to 1 year	0,64±0,11	0,89±0,07
по некоторым нозологическим формам болезней: / nosological forms of diseases:		
болезни крови и кроветворных органов diseases of the blood and hematopoietic organs	0,66±0,11	0,89±0,07
анемии / anemia	0,66±0,11	0,87±0,08
болезни органов дыхания / respiratory diseases	0,67±0,11	0,89±0,07
врождённые аномалии / congenital anomalies	0,63±0,11	0,86±0,08

участвуют как экологические факторы, так и социальные условия.

Заключение

Результаты проведённых исследований подтверждают, что здоровье населения зависит от существующего ЭС территории и социальных условий его жизни, которые сложились на территории проживания.

Предложен индекс экологического благополучия (ИЭБ) и методика его расчёта, основанная на данных официальной статистики, с использованием условной нормы, соответствующей 50% обеспеченности показателя техногенного воздействия по краю.

На основе расчётов и районирования территории выделены ареалы по социально значимым и приоритетным природоохранным проблемам. Установлено, что напряжённое и кризисное ЭС сложилось соответственно в 31 и 6% административных территорий, а по социальным условиям – в 47 и 2% соответственно.

В формировании здоровья населения практически в равной степени принимают участие как социальные условия, так и ЭС территории проживания. Выявленные проблемы и связи, установленные между ними и показателями заболеваемости, позволят объективно наметить природоохранные и социально значимые мероприятия, направленные на улучшение здоровья населения в административно-территориальных единицах, и могут быть использованы при разработке экологической политики Пермского края.

References

1. Environmental Performance Index –About the EPI [Internet resource] <https://epi.yale.edu/> (Accessed: 05.11.2018).
2. Global Footprint Network – Ecological Footprint [Internet resource] <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/> (Accessed: 18.01.2021).
3. Sustainable Business Magazine – Ecological footprint – a vivid imprint of human morality [Internet resource] <https://csrjournal.com/> (Accessed: 18.01.2021) (in Russian).
4. Sustainability Now – Ecosystem Wellbeing Index (EWI) [Internet resource] <http://sustainabilitynow.com/> (Accessed: 09.11.2018).

5. Brilevskij M.N., Vitchenko A.N., Morozov E.V. Assessment of the ecological state of the territory of Belarus // Actual problems of geocology and landscape science. 2015. No. 2. P. 17–20 (in Russian).

6. Vojtekhovskaya E.V. The index of sustainable development of regions as a tool for assessing the results of a sustainable development strategy // Actual problems and prospects for the development of state statistics in modern conditions. Saratov: Saratovskiy sotsialno-ekonomicheskii institut, 2016. P. 20–25 (in Russian).

7. Group of Companies “ECOLOGY” – Environmental and medical assessment of Moscow [Internet resource] <http://ecology.ru/> (Accessed: 11.11.2018) (in Russian).

8. Independent Evaluation Department – Ecological map of Moscow. Assessment of the apartment taking into account the pollution of the city area [Internet resource] <https://www.ocenka-i.ru/ecologiya.html/> (Accessed: 11.11.2018) (in Russian).

9. Bakumenko L.P., Korotkov P.A. Integral assessment of the quality and degree of environmental sustainability of the region’s environment (on the example of the Republic of Mari El) // Prikladnaya ekonometrika. 2008. No. 1 (9). P. 73–92 (in Russian).

10. Sadov A.V., Napolov O.B. Role and meaning of natural resources at working out ecologically balanced development of the region // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 2. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-2-021-027

11. Kaplina S.P., Kamanina I.Z. Comprehensive assessment of the ecological state of Dubna, Moscow region // Ekologiya urbanizirovannyh territoriy. 2017. No. 2. P. 30–35 (in Russian).

12. Minkina A.V. Development of the index of ecological well-being of the territory on the example of the Perm Region // Development of geographical research in Belarus in the XX–XXI centuries. Minsk: Belarusian State University, 2021. P. 182–188 (in Russian).

13. Isaeva A.Yu., Khripkov Yu.I., Poklonsky D.L., Zygin D.A., Semenov E.A., Lagutkina E.E. Joint impact of ecologically dangerous factors // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 4. P. 25–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-025-031

14. Minkina A.V. Spatial characteristics of the ecological state of water resources of the administrative districts of Perm Krai // Modern problems of reservoirs and their watersheds. Perm: Perm State University, 2021. P. 469–474 (in Russian).

15. Minkina A.V., Dvinskih S.A., Zueva T.V. The use of the geosystem ecological well-being index in the development of regional environmental policy // Geographical space: balanced development of nature and society. Chelyabinsk: Kray Ra, 2021. P. 189–196 (in Russian).

VIII съезд Общества почвоведов им. В. В. Докучаева

В период с 10 по 14 августа 2022 г. в г. Сыктывкаре (Республика Коми) состоялся VIII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Съезд почвоведов – масштабный форум, собирающий для обсуждения актуальных проблем почвоведения учёных со всех регионов Российской Федерации и стран ближнего зарубежья.

Основная часть заседаний комиссий, подкомиссий и рабочих групп Общества прошла в онлайн-формате в период с апреля 2021 г. по июнь 2022 г. (https://ib.komisc.ru/add/conf/soil2020/?page_id=559). Делегатские собрания, пленарные сессии и заседания собраний состоялись после снятия ограничений 10–14 августа 2022 г. на базе Института биологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» и Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина в очно-заочном формате. Девиз VIII съезда почвоведов: «Почвы – стратегический ресурс России».

Для участия в съезде было зарегистрировано 820 заявок от учёных из 79 городов и принято для публикации 790 тезисов докладов, в том числе от участников из стран ближнего (Узбекистан, Казахстан, Азербайджан, Республика Беларусь) и дальнего (Чили, Германия, Турция) зарубежья. На съезд от 37 отделений Общества почвоведов делегировано 139 человек, из них приехали в г. Сыктывкар для очного участия в съезде 81 делегат, 58 делегатов принимали участие в съезде в онлайн формате.

На заседаниях VIII съезда Общества почвоведов, включая онлайн-заседания, проведённые в период с апреля 2021 по июнь 2022 гг., было заслушано и обсуждено в совокупности 17 пленарных и 546 секционных докладов по различным проблемам современного почвоведения, земледелия, мелиорации, функциям почв и почвенного покрова в биосфере. В рамках работы съезда рассмотрены вопросы оценки, нормирования и управления почвенными и земельными ресурсами России, междисциплинарные вопросы органо-биотических, минерально-биотических и органо-минеральных взаимодействий в почвах, биогеохимических циклов углерода, азота, кислорода, фосфора и других элементов в системе «грунтовые воды – породы – почва – растения – атмосфера», катастрофических

и пост-антропогенных процессов развития почв, кризисных и оптимальных этапов почвообразования как ретроспективной основы для оценки современного состояния почвенного покрова и прогноза его развития в результате глобальных и региональных изменений климата. Рассмотрены сценарии возможных изменений экосистем в условиях климатических вызовов и выработка стратегии поведения, обсуждены вопросы агроэкологической типологии и группировки земель, идентификации почвенно-ландшафтных связей, разработки ГИС агроэкологической оценки земель и проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия, экологических нормативов земледелия и землепользования.

Ознакомиться с докладами можно на сайте съезда (https://ib.komisc.ru/add/conf/soil2020/?page_id=692), в опубликованных сборниках тезисов (https://ib.komisc.ru/add/conf/soil2020/?page_id=675) и в сборнике IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (<https://iopscience.iop.org/journal/1755-1315>), где представлены расширенные материалы отдельных докладов.

В период съезда и после его окончания состоялась серия научных почвенных экскурсий. На однодневных экскурсиях участники ознакомились с почвами уникального геологического заказника «Каргортский», спецификой первичного почвообразования на техногенно нарушенных территориях, особенностями изменения почв и почвенного органического вещества в процессе воздействия на лесные экосистемы лесозаготовительных мероприятий и пожаров. Во время многодневных послесъездовских экскурсий совершили автобусный тур от г. Сыктывкара до г. Кирова и познакомились с особенностями формирования подзолистых и дерново-подзолистых почв на покровных суглинках в зональном ряду от средней до южной тайги, спецификой развития в них процессов подзолообразования и дернового процесса, особенностями их изменения под влиянием агро- и постагрогенной трансформации; посетили г. Воркуту, где вниманию участников экскурсии были представлены различные типы тундровых почв и их агрогенные и постагрогенные аналоги.

В рамках съезда была проведена Школа молодых учёных по морфологии и классификации почв и первые в России соревнования

по «спортивному почвоведению» (7–9 августа 2022 г.). Для участия в работе Школы зарегистрировались команды студентов и аспирантов ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва), Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург), географического факультета и факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (г. Москва), РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева (г. Москва), Казанского федерального университета (г. Казань), Поволжского государственного технологического университета (г. Йошкар-Ола), Уральского государственного лесотехнического университета (г. Екатеринбург), Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону). Участники Школы прослушали курсы лекций по классификации почв, приняли участие в мастер-классах по описанию почв и определению их гранулометрического состава в полевых условиях, творческом мастер-классе по эстетической функции почв, попробовали сами изготовить уникальные арт-объекты из образцов почв и приняли активное участие непосредственно в самих соревнованиях по полевому описанию почв. Первое место завоевала команда факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, второе – Почвенного института им. В.В. Докучаева, третье – Казанского (Приволжского) федерального университета.

Итогом работы VIII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева стало переизбрание Президента Общества, Почётных членов и членов Центрального совета Общества. Президентом Общества почвоведов им. В.В. Докучаева избран декан факультета почвоведения МГУ им. В.В. Докучаева, член-корреспондент РАН Павел Владимирович Красильников. IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева планируется провести в 2024 г. в г. Казани, Республика Татарстан.

Оргкомитет искренне признателен Правительству Республики Коми, руководству ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкарского государственного университета им. Питири-ма Сорокина, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Вятского государственного университета, Института геологии и Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Русскому географическому обществу, ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», АО «Монди СЛПК», ООО «МИЛЛАБ Система», ПАО Банк ВТБ, администрации МО ГО «Воркута» за поддержку съезда и помощь в его подготовке и проведении.

*Организационный комитет
VIII съезда Общества почвоведов
им. В.В. Докучаева*

VIII СЪЕЗД ОБЩЕСТВА ПОЧВОВЕДОВ ИМ. В. В. ДОКУЧАЕВА И ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ПО МОРФОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004