



2021

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

ISSN 1995-4301 (PRINT)
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

№ 2

Theoretical and
Applied Ecology



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ**

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

**МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ
ОПЕРАТОР
РОСАТОМ

КОМПЛЕКСНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА ПОЛНОГО ИННОВАЦИОННОГО ЦИКЛА (КНТП) «ОБРАБОТКА, УТИЛИЗАЦИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ I И II КЛАССОВ ОПАСНОСТИ»

Данная КНТП рассмотрена в ФГУП «Федеральный экологический оператор» («ФЭО») Госкорпорации «Росатом». *Целью комплексного проекта* является разработка высокоэффективных экологически безопасных технологий, оборудования и систем контроля за обезвреживанием техногенных отходов I–II классов опасности, с получением вторичных продуктов и их использование в народном хозяйстве для создания Экотехнопарков в составе производственно-технического комплекса (ПТК) в соответствии с современными требованиями к обращению с отходами I–II классов опасности.

В составе КНТП поддерживаются проекты по приоритетным направлениям:

I – Технические решения, технические регламенты, опытные установки для повышения эффективности работы технологических линий на участке «Физикохимия» для ПТК регионов – 11 проектов.

II – Повышение эффективности и безопасности функционирования объектов обезвреживания отходов I–II классов опасности. Снижение риска негативного воздействия химических веществ на окружающую среду и человека – 6 проектов.

III – Новые технические решения по обезвреживанию и переработке жидких техногенных отходов I–II классов опасности – 6 проектов.

Необходимость выполнения НИР и ОКР по указанным направлениям в период 2021–2024 гг. связана с тем, что по завершению создания четырёх и строительству новых трёх ПТК должны быть созданы научно-технические заделы для реализации концепции создания Экотехнопарков на базе ПТК и новой отрасли по использованию ценного вторичного сырья для получения новой продукции.

От вузов участников Консорциума в настоящий момент в КНТП включено 23 проекта и ещё три проекта находятся на согласовании с руководством ФГУП «ФЭО». Ответственным исполнителем комплексного проекта КНТП является ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева». Ис-

полнителями проектов комплексной научно-технической программы являются: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Национальный исследовательский Томский государственный университет, ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН» (см. цветную вкладку).

Основными показателями проектов КНТП будут являться: новые технологии по переработке вторичных продуктов, которые могут образовываться при обезвреживании отходов I–II классов опасности; технические решения; технологические регламенты; программы и методики испытаний; конструкторская документация; пилотные образцы установок; технические условия на вторичные продукты; компьютерные программы; опытные партии продуктов; программы и действующие системы экологического контроля и мониторинга. Кроме того, индикаторами каждого проекта, которые необходимо запланировать и выполнить, являются: патенты, публикации в высокорейтинговых журналах, монографии, учебные пособия, подготовка по тематике исследования выпускных квалификационных работ бакалавров, магистров, кандидатских и докторских диссертаций аспирантов и докторантов.

*Проректор по науке
РХТУ им. Д.И. Менделеева,
д.х.н., профессор, А.А. Щербина*

*Координатор КНТП РХТУ
им. Д.И. Менделеева, д.т.н., профессор,
зав. кафедрой ТНВ и ЭП В.А. Колесников*

Комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Обработка, утилизация и обезвреживание техногенных отходов I и II классов опасности»

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Направление I. Технические решения, технические регламенты, опытные установки для повышения эффективности работы технологических линий на участке «Физикохимия» для ПТК регионов
ПРОЕКТЫ

1. Разработка опытно-технологического регламента высокотемпературной обработки смеси гидроксидов металлов для линии № 9 участка «Физикохимия». Получение новых образцов керамических материалов (руководитель: Д.О. Лемешев, РХТУ)
2. Разработка технических решений энергоэффективного функционирования единого комплекса модулей обессоливания (обратный осмос – выпарка) для технологических растворов на участке «Физикохимия» ПТК (А.В. Десятов, РХТУ)
3. Разработка технических решений, технологического регламента по обезвреживанию твердых и пастообразных металлосодержащих отходов I–II классов опасности на участке «Физикохимия» (В.А. Колесников, РХТУ)
4. Разработка составов технологии получения влагостойких и светостойких сухих красящих пигментов на основе неорганических отходов I и II классов опасности, содержащих соединения Cu, Al, Ti, Fe, Cr, Zn, Ni, Ba, Co и др. (Н.В. Сырчина, ВятГУ)
5. Разработка технологии и опытной установки для электромембранного процесса получения реагентов из вторичного продукта $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и обессоленной воды (пермеата обратного осмоса), образующихся при обезвреживании кислотно-щелочных растворов I–II классов опасности на ПТК ФГУП «ФЭО» (А.В. Колесников, РХТУ)
6. Разработка технологии производства безобжиговых (геополимерных) конструкционных, теплоизоляционных и отделочных строительных материалов с использованием механохимически активированных нетоксичных отходов, образующихся при переработке отходов I и II классов опасности на участке «Физикохимия» и обезвреживании ртутьсодержащих отходов (А.В. Страхов, СГТУ)
7. Разработка технологий и опытной установки для экстракционно-электрохимических процессов переработки осадков, содержащих смесь гидроксидов Cu, Zn, Ni, Al, Cd, Fe, Cr с получением металлов и сплавов (А.Ф. Губин, РХТУ)
8. Разработка модуля извлечения и выделения редких металлов переменной валентности для линии 1 участка «Физикохимия» ПТК (В.А. Бродский, РХТУ)
9. Разработка технологии и создание мобильной установки производительностью до $1 \text{ м}^3/\text{час}$ для обезвреживания жидких кадмий-содержащих отходов, поступивших на ПТК (П.Н. Кисиленко, РХТУ)
10. Разработка технологии утилизации продуктов термического обезвреживания отходов I–II классов опасности (шлаков) в качестве добавок в бетон, цемент, строительные материалы (С.П. Сивков, РХТУ)

Направление II. Повышение эффективности и безопасности функционирования объектов обезвреживания отходов I–II классов опасности. Снижение риска негативного воздействия химических веществ на окружающую среду и человека
ПРОЕКТЫ

1. Разработка программы и системы комплексного экологического мониторинга контроля деятельности и природообустройства ПТК «Марадыковский» (руководитель: Т.Я. Ашихмина, ВятГУ)
2. Разработка программы обеспечения экологической безопасности и мониторинга воздействия регионального ПТК «Горный» по переработке и утилизации техногенных отходов I и II классов опасности на состояние окружающей среды (Е.И. Тихомирова, СГТУ)
3. Разработка системы комплексного мониторинга техногенно-нагруженных территорий и ПТК по обезвреживанию отходов I–II классов опасности в Иркутской области» (Е.В. Зелинская, ИРНИТУ)
4. Разработка программы и системы комплексного экологического мониторинга и контроля деятельности ПТК по обезвреживанию и утилизации отходов I и II классов опасности, состояния объектов природообустройства ПТК (И.Л. Бухарина, Удмуртский государственный университет)
5. Оценка пожаровзрывоопасности жидких отходов I–II классов опасности (водно-органических составов), поступающих на ПТК (А.Я. Васин, РХТУ)
6. Создание системы параметрического контроля образования диоксинов в пределах норм экологической безопасности в установках по термическому обезвреживанию отходов на ПТК регионов (В.Г. Петров, УдмФИЦ УрО РАН)

Направление III. Новые технические решения по обезвреживанию и переработке жидких техногенных отходов I–II классов опасности (Объекты: ПТК, в том числе новые)
ПРОЕКТЫ

1. Разработка технологии обработки жидких отходов химического и электрохимического никелирования и хромирования с получением высокоэффективных комплексных катализаторов, фотокатализаторов для процессов окисления-восстановления (А.В. Гороховский, СГТУ)
2. Разработка технологии получения антисептических составов с продолжительным периодом защитного действия для пропитки древесины на основе неорганических и органических отходов I и II классов опасности (Г.Я. Кантор, ВятГУ)
3. Технология извлечения хрома из хромосодержащих вторичных продуктов на участке «Физикохимия» с возвратом хрома в форме ликвидных соединений Cr(VI) (С.И. Степанов, РХТУ)
4. Разработка технологии утилизации гидроксидов железа и никеля из вторичных продуктов (гидроксиды), образующихся на линии 1 (к-щ) участка «Физикохимия» (Л.Н. Ольшанская, СГТУ)
5. Новые трудновываемые биозащитные препараты с применением утилизированных хромосодержащих вторичных продуктов участка «Физикохимия» (Н.И. Акинин, РХТУ)
6. Разработка технологий выделения из вторичных продуктов переработки отходов I и II классов опасности ценных элементов и их композиций, и создание линейки продукции с повышенной добавочной стоимостью на их основе (В.И. Сачков, ТГУ)
7. Мониторинг выполнения проектов в рамках КНТП «Обработка, утилизация и обезвреживание техногенных отходов I и II классов опасности» (А.А. Щербина, РХТУ)

ПРОЕКТЫ НА СОГЛАСОВАНИИ:

1. НИ Томского государственного университета (руководитель В.И. Сачков)
2. Удмуртского государственного университета (С.М. Решетников)
3. ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» (Е.В. Зелинская)



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 2, 2021
<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 (№ 2197 по состоянию на 21.04.2021).

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, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного университета
Зам. главного редактора Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор Вятского государственного агротехнологического университета
Зам. главного редактора С.В. Дёгтева, д.б.н., директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН
Зам. главного редактора И.Г. Широких, д.б.н., 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 Института биологии 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. Подписные индексы 82027, 48482 в каталоге Агентства «Роспечать». 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, Динамовский проезд, 4.

Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, фото на 4-й стр. обложки – Александр Широких, перевод – Григорий Кантор, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов © Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 22.06.2021.
Тираж 250 экз. Заказ № 0837. Цена свободная.

Отпечатано в «Кировской цифровой типографии», ИП Плюсин Н.В.
Адрес типографии: 610017, Кировская область, г. Киров, ул. Молодой Гвардии, 57 а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, научный руководитель Федерального исследовательского центра «Коми НЦ УрО РАН»
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., старший научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Доронников** к.с.-х. н., научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., 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, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор Вятского государственного университета
- В.А. Коток** к.т.н., доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- А.В. Кучин** д.х.н., член-корр. РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии 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 Казанского федерального университета
- Ли Юй** профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета, иностранный член РАН (КНР)
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, зав. лабораторией Института биологии Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., директор Института химии Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, лётчик-космонавт, дважды Герой СССР
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., ведущий научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Б.Н. Хойницки** д.б.н., профессор Познаньского университета наук о жизни (Польша)
- В.И. Холстов** д.х.н., руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор Вятского государственного университета

12+



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 2, 2021

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, Head of Laboratory of Vyatka State University, Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

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

Doctor in Biology, Professor of Vyatka State Agrotechnological University

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

Doctor in Biology, Director of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

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

Doctor in Biology, 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, Researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of 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 82027, 48482
in the catalogue of Agency "Rospechat".

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: 4 Dynamoskiy proezd,

Kirov region, Russia, Kirov, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Back cover photo – Aleksandr Shirokikh. Translation – Grigoriy Kantor. 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: 22 June 2021.

Circulation 250 copies. Order No. 0837. Free price.

"Kirov digital printing house"

Printing Address: 57 a Molodoy Gvardii 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, Scientific Director of the Federal Research Center "Komi Science Center of the Ural Branch of RAS"
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Senior Researcher of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Georg August University of Göttingen (Germany)
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of the Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyets** Doctor in Biology, 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 of Vyatka State University
- V.A. Kotok** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Corresponding Member of RAS, Professor, Scientific Director of Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University, Foreign Associate of RAS (China)
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, 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, Director of the Institute of Chemistry of the Komi Science Centre of the Ural Branch of 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, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Leading Researcher of A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, 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 Assiut University (Egypt)
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- В. С. Артамонова* Фитобиомы в техногенной среде обитания (обзор)6
Т. И. Кутявина, Т. Я. Ашихмина Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор)13
А. С. Олькова, Т. Я. Ашихмина Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор)22

СТАТЬИ

- Е. Б. Мельникова, А. Н. Серебrenников, А. В. Мельников* Метод оценки продуктивности морских акваторий по интегральной интенсивности биолюминесценции сообщества планктонных организмов31
М. Н. Артамонова, Н. И. Потатуркина-Нестерова, Б. Б. Костишко Оценка стабильности морфофункциональных свойств ризосферных штаммов *Bacillus subtilis* с помощью атомно-силовой микроскопии38
О. А. Плотникова Усовершенствование флуориметрического метода для определения полициклических ароматических углеводов в объектах окружающей среды44

- Б. И. Кочуров, П. И. Меркулов, С. В. Меркулова, С. Е. Хлёвина* Влияние современных климатических изменений на региональные агроэкосистемы Республики Мордовия49
Е. В. Максютова, Л. Б. Башалханова, Л. М. Корытный, А. А. Сороковой Природноклиматические факторы в экологическом зонировании г. Иркутска55
М. А. Студёнова, И. И. Студёнов, Д. В. Чупов, А. С. Самодов Зообентос дельты реки Северная Двина60
И. А. Белозерцева, И. Б. Воробьева, Н. В. Власова, Д. Н. Лопатина, М. С. Янчук Экологическое состояние побережья Малого моря и его влияние на загрязнение озера Байкал66
Н. В. Лиханова Биоразнообразие и микоризообразование лекарственных растений на залежных участках75
К. А. Безденежных, Л. В. Кондакова, Е. В. Дабах, Т. Я. Ашихмина Альгологический мониторинг почв в районе объекта «Марадыковский»81

- Ю. С. Глазнецова* Особенности трансформации старого нефтяного загрязнения в почвах Арктической зоны Якутии89
Е. Ю. Кряжева, Е. М. Лаптева, С. В. Денева, Ю. В. Холопов, Н. В. Бадулина, Г. Г. Осадчая Оценка антропогенного загрязнения тяжёлыми металлами и мышьяком почв города Ухта (Республика Коми)95

- А. В. Каверин, А. В. Кирюшин, Д. А. Массеров* Экологизация сельскохозяйственной науки и производства – сельскохозяйственная экология – сельскохозяйственная экология (в свете научного наследия Н. Ф. Реймерса)102
Н. В. Сырчина, Н. Н. Богатырёва, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор Хвосты обогащения фосфоритов Вятско-Камского месторождения как вторичные материальные ресурсы для производства натуральных удобрений107
А. А. Калинин, Д. С. Давидюк, Н. А. Боков, Р. И. Абубакирова, А. А. Широких Влияние нового биокомпозита на основе грибов рода триходерма на почвенные микроорганизмы и растения разных таксонов115
И. Г. Широких, Я. И. Назарова, Н. А. Боков, Т. Я. Ашихмина Сравнительная характеристика роста и целлюлазной активности стрептомицетов на различных субстратах122
И. Ю. Иванова, Д. А. Дементьев Влияние микробиологических препаратов на урожайность яровой мягкой пшеницы128

- С. С. Хрущев, Т. В. Дрозденко, Т. Ю. Плюснина, И. В. Тимофеев, Д. А. Тодоренко, Е. И. Тихомирова, Т. К. Антал* Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью нейросетевого анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла134
М. М. Герцен, Е. Д. Дмитриева Детоксицирующая способность гуминовых веществ торфов и микроорганизмов рода *Rhodococcus* по отношению к нефтепродуктам в водных средах142

- И. В. Трусей, Ю. Л. Пуревич, В. П. Ладыгина, С. В. Фадеев* Стимуляция аборигенной аэробной микрофлоры для биоремедиации грунтов, загрязнённых нефтепродуктами149

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ
ПРИРОДНЫХ
СРЕД
И ОБЪЕКТОВ

АГРОЭКОЛОГИЯ

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

РЕМЕДИАЦИЯ
И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

- М. С. Третьякова, Л. А. Беловежец, Л. Г. Соколова, С. Ю. Зорина, Ю. А. Маркова* Влияние ризосферных бактерий-нефтедеструкторов на биологическое состояние почвы, загрязнённой нефтью 156
- Н. А. Ушакова, С. В. Зиновьева, Ж. В. Удалова, А. И. Бастраков, А. И. Бутенко* Биоутилизация органических отходов личинками мухи *Hermetia illucens* и возможность применения образованного зоокомпоста против фитонематод 163
- А. А. Krivushina, T. V. Bobyreva, J. S. Goryashnik, T. V. Yakovenko, A. B. Laptev* Micromycetes on polymeric materials under natural conditions of warm humid climate and simulated tropical climate conditions 170
- А. В. Сошина* Экологические и субстратные характеристики эпилитной группы лишайников в условиях Северо-Запада России 176
- Л. И. Домрачева, С. Г. Скугорева, А. И. Коротких, Ю. С. Забубенина, Л. В. Трефилова, А. Л. Ковина, Е. А. Домнина, А. С. Тимонов* Рост и развитие люпина узколистного в присутствии лишайнобиоты 183
- Л. Н. Пак* Оценка выживаемости и роста потомства лиственницы (*Larix*) разного географического происхождения в Восточном Забайкалье 189
- И. А. Лиханова, Т. Н. Пыстина, Г. С. Шупаниникова, Г. В. Железнова* Восстановление сосняков лишайниковых на карьерах среднетаёжной подзоны Северо-Востока европейской части России 196
- А. С. Лелеков, А. Б. Боровков, И. Н. Пудвилович, Т. М. Новикова, А. Л. Авсиян, О. А. Меметшаева, Р. П. Тренкениш* Расчёт максимальной продуктивности *Dunaliella salina* Teod. в условиях естественного освещения 202
- С. Ю. Гагаев, С. Г. Денисенко, А. В. Сикорский, Н. А. Стрелкова, Е. А. Фролова* Многощетинковые черви (*Polychaeta*) Печорского моря: биоразнообразие и распределение 208
- С. В. Пестов, Д. А. Филиппов* Структура хортобионтной энтомофауны среднетаёжного болота (Вологодская область) 215
- Э. И. Бознак, А. Б. Захаров* Изменение ростовых процессов европейского хариуса тиманского водотока в условиях неконтролируемой эксплуатации 222

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

- Н. П. Савиных, С. В. Шабалкина, О. Н. Пересторонина* Особенности выделения высоких природоохранных ценностей типа «Редкие экосистемы и местообитания» для сертификации лесов Кировской области 229
- О. Е. Чезлова, А. А. Волчек* Элиминация фекальных индикаторных бактерий в почвах при многократном поливе животноводческими стоками 235

ИНФОРМАЦИЯ

- XVI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» 242

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

- V. S. Artamonova* Phytobiomes in the technogenic environment (review) 6
- T. I. Kutjavina, T. Ya. Ashikhmina* Current state and problems of monitoring of surface water bodies in Russia (review) 13
- A. S. Olkova, T. Ya. Ashikhmina* Factors of obtaining representative results of bioassay of aquatic environments (review) 22

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

- E. B. Mel'nikova, A. N. Serebrennikov, A. V. Melnikov* A method for assessing the productivity of marine areas by the integrated intensity of bioluminescence of the planktonic community 31
- M. N. Artamonova, N. I. Potaturkina-Nesterova, B. B. Kostishko* The stability assessment of the morphological and functional characteristics of rhizospheric strains of *Bacillus subtilis* using atomic force microscopy 38
- O. A. Plotnikova* Improvement of fluorometric method for polycyclic aromatic hydrocarbons determination in environmental objects 44

MONITORING OF ANTHROPO- GENICALLY DIS- TURBED AREAS

- B. I. Kochurov, P. I. Merkulov, S. V. Merkulova, S. E. Hljovina* Influence of modern climate changes on the regional agroecosystems of the Republic of Mordovia 49
- E. V. Maksyutova, L. B. Bashalkhanova, L. M. Korytny, A. A. Sorokovoi* Natural-climatic factors in ecological zoning of the city of Irkutsk 55
- M. A. Studenova, I. I. Studenov, D. V. Chupov, A. S. Samodov* Zoobenthos of the Severnaya Dvina River delta 60
- I. A. Belozertseva, I. B. Vorobyeva, N. V. Vlasova, D. N. Lopatina, M. S. Yanchuk* Ecological condition of the coast of the Maloe More strait and its influence on pollution of Lake Baikal 66
- N. V. Likhanova* Biodiversity and mycorrhizal formation of medicinal plants in the fallow areas of the Botanical garden 75

CONTENTS

REVIEWS

ARTICLES

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

AGROECOLOGY

ECOTOXICOLOGY

**REMEDICATION
AND RECULTIVATION**

**POPULATION
ECOLOGY**

SOCIAL ECOLOGY

INFORMATION

K. A. Bezdenzhnykh, L. V. Kondakova, E. V. Dabakh, T. Ya. Ashikhmina Algological monitoring of soils in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” 81

Yu. S. Glyaznetsova Features of transformation of old oil pollution in the soils of the Arctic zone of Yakutia 89

E. Yu. Kryazheva, E. M. Lapteva, N. V. Badulina, S. V. Deneva, Yu. V. Kholopov, G. G. Osadchaya Assessment of anthropogenic pollution by heavy metals and arsenic in soils of Ukhta city (Komi Republic) 95

A. V. Kaverin, A. V. Kiryushin, D. A. Masserov Ecologization of agricultural science and production – agricultural ecology – agricultural econology (in the light of the scientific heritage of N. F. Reymers) 102

N. V. Syrchina, N. N. Bogatyreva, T. Ya. Ashikhmina, G. Ya. Kantor Tailings of enrichment of phosphorites of the Vyatka-Kama deposit as secondary material resources for the production of natural fertilizers 107

A. A. Kalinin, D. S. Davidyuk, N. A. Bokov, R. I. Abubakirova, A. A. Shirokikh Effect of the new biological product created on the basis of *Trichoderma* on soil microorganisms and plants of different taxons 115

I. G. Shirokikh, Ya. I. Nazarova, N. A. Bokov, T. Ya. Ashikhmina Comparative characteristics of the growth and cellulase activity of streptomycetes on different substrates 122

I. U. Ivanova, D. A. Dementiev Influence of microbiological preparations on yield of spring soft wheat 128

S. S. Khrushchev, T. V. Drozdenko, T. Yu. Plyusnina, I. V. Timofeev, D. A. Todorenko, E. I. Tikhomirova, T. K. Antal Heavy metal toxicity detection in phytoplankton by using neural network analysis of chlorophyll fluorescence induction 134

M. M. Gertsen, E. D. Dmitrieva Binding capacity of humic substances of peats in the relation to petroleum products in the presence of microorganisms of the genus *Rhodococcus* in aqueous media 142

I. V. Trusei, Yu. L. Gurevich, V. P. Ladygina, S. V. Fadeev Stimulation of indigenous aerobic microflora for bioremediation of soils polluted with petroleum products 149

M. S. Tretyakova, L. A. Belovezhets, L. G. Sokolova, S. Yu. Zorina, Yu. A. Markova Effect of rhizospheric oil-degrading bacteria on the biological state of oil-polluted soil 156

N. A. Ushakova, S. V. Zinovieva, Zh. V. Udalova, A. I. Bastrakov, A. I. Butenko The biodisposal of organic waste by larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens* and the possibility of using the formed zoocompost against phytonematodes 163

A. A. Krivushina, T. V. Bobyрева, J. S. Goryashnik, T. V. Yakovenko, A. B. Laptev Micromycetes on polymeric materials under natural conditions of warm humid climate and simulated tropical climate conditions 170

A. V. Sonina Ecological and substrate characteristics of epilithic group of lichens in the conditions of the North-West of Russia 176

L. I. Domracheva, S. G. Skugoreva, A. I. Korotkikh, Yu. S. Zabubenina, L. V. Trefilova, A. L. Kovina, E. A. Domnina, A. S. Timonov Growth and development of *Lupine angustifolia* L. in the presence of lichen biota 183

L. N. Pak Evaluation of survival and growth of larch (*Larix*) progeny of different geographical origin in Eastern Transbaikalia 189

I. A. Likhanova, T. N. Pystina, G. S. Shushpannikova, G. V. Zheleznova Reforestation of lichen pine forests at the open pits in the middle taiga of the North-East of European part of Russia 196

A. S. Lelekov, A. B. Borovkov, I. N. Gudvilovich, T. M. Novikova, A. L. Arsiyan, O. A. Memetshaeva, R. P. Trenkenshu Estimation of *Dunaliella salina* Teod. maximum productivity under natural illumination 202

S. Yu. Gagaev, S. G. Denisenko, A. V. Sikorsky, N. A. Strelkova, E. A. Frolova Pechora Sea polychaete worms: biodiversity and spatial distribution 208

S. V. Pestov, D. A. Philippov Structure of the plant-inhabiting insect fauna in a middle-taiga mire (Vologda Region, Russia) 215

E. I. Boznak, A. B. Zakharov The changes in growth processes of the European grayling from the Timan stream in conditions of non-controlled exploitation 222

N. P. Savinykh, S. V. Shabalkina, O. N. Perestoronina Features of the allocation of high conservation values of type “Rare ecosystems and habitats” for certification of forests of the Kirov region 229

O. E. Chezlova, A. A. Volchak Elimination of fecal indicator bacteria in soils at repeated irrigation with livestock waste 235

XVI All-Russian scientific-practical conference with international participation “Ecology of the native land: problems and ways to solve them” 242

Фитобиомы в техногенной среде обитания (обзор)

© 2021. В. С. Артамонова, д. б. н., в. н. с.,
Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 8/2,
e-mail: artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru

В регионах добычи и переработки твёрдых полезных ископаемых наблюдается тенденция роста техногенных отходов и увеличения территорий с накопленным экологическим ущербом. Вследствие этого разрушаются уникальные растительные сообщества, исчезают редкие виды. Их восстановление предполагается осуществлять с применением наилучших современных технологий. Вместе с тем, в ненарушенных местообитаниях отношения сосуществования растений с организмами-симбионтами сформировались коэволюционно. На корнях орхидных, голосеменных, бобовых и многих других растений образовались специализированные структуры – эндо- и экзомикоризы, ризобийные бактериоиды, которые обеспечивают фитопартнёру симбиотрофное питание. В техногенной среде симбиоз растений с микро- и бактериосимбионтами разрушен, его восстановление идёт медленно из-за отсутствия в корнеобитаемом слое организмов-симбионтов. На продолжительность симбиозообразования, микро- и бактериотрофность растений негативно влияет наличие экотоксикантов, которые обуславливают преждевременное старение микориз и клубеньков, развитие паразитического образа жизни микосимбионтов. В данной статье подчеркивается необходимость проведения мониторинговых наблюдений за состоянием симбиотрофных растений в лесонасаждениях на рекультивируемых отходах, а также раннего выявления признаков ухудшения взаимоотношений между корневыми сожителями. Делается акцент на мультидисциплинарное изучение экологии и специфики симбиозообразования, особенно у редких растений, для ускорения восстановления многообразия симбиозов.

Ключевые слова: техногенные отходы, симбиоз, фитобиом, рекультивация.

Phytobiomes in the technogenic environment (review)

© 2021. V. S. Artamonova ORCID: 0000-0001-8606-7975
Russia Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS,
8/2, Lavrentieva St., Novosibirsk, Russia, 630090,
e-mail: artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru

In the regions of mining and processing solid minerals, there is a tendency to increase man-made waste and increase the territories with accumulated environmental damage. As a result, unique plant communities are destroyed, rare species disappear. Their restoration is supposed to be carried out using the best modern technologies. At the same time, in undisturbed habitats, the relations of co-existence of plants with symbiont organisms were formed coevolutionarily. On the roots of orchids, gymnosperms, legumes and many other plants, specialized structures were formed – endo- and exomycorrhizae, rhizobial bacteroids, which provide the phytoperartner with symbiotrophic nutrition. In the technogenic environment, the phenomenon of plant symbiosis with myco- and bacteriosymbionts is destroyed, its recovery is slow due to the lack of symbiont organisms in the root layer. The duration of symbiosis, myco- and bacteriotrophy of plants, is negatively affected by the presence of ecotoxicants, which cause premature aging of mycorrhizae and nodules, the development of a parasitic lifestyle of mycosymbionts. This article emphasizes the need for monitoring the state of symbiotrophic plants in forest plantations on recultivated waste, as well as early detection of signs of deterioration in the relationship between root cohabitants. The focus is on the multidisciplinary study of the ecology and the specifics of symbiosis, especially in rare plants, to accelerate the restoration of the diversity of symbioses.

Keywords: technogenic waste, symbiosis, phytobiome, recultivation.

В ресурсных регионах Российской Федерации (РФ) угольная промышленность и металлургия являются основными отходообразующими отраслями. Техногенные отходы (ТО) представлены вскрышными породами

полезных ископаемых и продуктами их переработки. На Урале и в Сибири они традиционно складировались в отвалы. По экспертным оценкам [1], только в Кузбассе (Кемеровская обл.) их площадь достигла 40 тыс. га, рекуль-

тивировано около 10%. Многолетняя дислокация многотоннажных ТО на дневной поверхности обуславливает расширение территорий с накопленным экологическим ущербом. Их самозарастание происходит медленно, среди фитопоселенцев присутствуют зональные и адвентивные виды, в том числе редкие, однако большинство растений формируют мозаичные временные ассоциации. Для ускорения процесса восстановления биоразнообразия в 2017 г. введён национальный стандарт наилучших доступных технологий [2]. Он соответствует международным требованиям «Об экологической ответственности в отношении предупреждения и устранения экологического ущерба от 2004/35/ЕС». Впервые в отечественном нормативном документе представлены положения, отражающие необходимость проведения микробиологических обработок при осуществлении очагового восстановления. Посев семян трав, кустарников, деревьев, а также высадка посадочного материала должны осуществляться с предварительной обработкой биодинамическими стимуляторами и комплексными биопрепаратами на основе арбускулярных микориз, цианобактерий и других адаптивных микроорганизмов (МО). Их привлечение для повышения жизненного статуса культурных растений в техногенных условиях отражено и в региональном руководстве «Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе» [1]. В документе акцентируется внимание на обработке семян хвойных пород противогрибковыми препаратами, черенков ивы – биопрепаратами ростстимулирующего действия. В 2019 г. рекомендовано использование посадочного материала хвойных пород с микробиологической защитой корневой системы при осуществлении искусственного и комбинированного лесовосстановления (лесоразведения) на вскрышных токсичных породах [3]. Это может быть вскрыша с высоким содержанием вмещающих сульфидсодержащих пород, хвосты обогащения железосодержащих и полиметаллических руд.

Лесной рекультивации (ЛР) нарушенных земель в горнодобывающих районах Сибири уделяется особое внимание, поскольку в них сосредоточено 80% лесосечного фонда, подверженного сокращению из-за интенсивной добычи подземных ресурсов – стратегически важного сырья регионального и федерального значения. Потери лесов усугубляются также отчуждением земель под складирование ТО.

Восстановление лесных сообществ необходимо, но проблематично как теоретически, так и практически. Ненарушенные таёжные экосистемы, в том числе представленные черневыми высококотовыми лесами, сохранили в своём составе уникальные виды былых эпох. Редкие виды относятся к семействам орхидные, бобовые, голосеменные и другие [4], которые требуют защиты. Почвы, сформированные под горно-таёжными лесами, имеют интразональный характер, обнаруживают признаки реликтовости. Поэтому восстановление биоразнообразия на ТО должно носить комплексный характер, учитывать особенности консортивных связей, многообразие симбиозов, специфичность корневых симбионтов и почвенной среды.

Современный тренд ЛР предполагает формирование устойчивых самоподдерживающихся паразональных древесно-травянистых сообществ с высоким биологическим разнообразием. При выборе растений предпочтение отдаётся видам, способным развивать широкозахватную корневую систему, формировать симбиоз с бактериями, макро- и микромицетами, в том числе привнесёнными. Но проведение экспертизы корнеобитаемого слоя до и после биологических обработок в ЛР не предполагается, несмотря на то, что поведение интродуцентов не всегда предсказуемо. Информация о том, выжили или нет привнесённые грибы и бактерии, проявили вирулентность или оказались консервативными в отношении инфицирования корней симбиотрофных древесных и травянистых растений, не учитывается.

Цель данного обзора – изучить проблему восстановления симбиозов высших растений с их корневыми сожителями на рекультивируемых ТО, то есть проблему восстановления ранее эволюционно сложившихся связей в фитобиоме. Феномен симбиоза широко распространён в природе, но для ТО информации о нём недостаточно. Поэтому в ЛР накопилось немало вопросов о причинах медленного восстановления симбиотрофных древесных и травянистых растений, изменения характера взаимодействия симбиотических партнёров в новых условиях их существования, причинах преждевременного старения микориз и клубеньков на корнях фитопоселенцев. Под термином «фитобиом» понимается интеграция высших растений с их эволюционными партнёрами-симбионтами в техногенной среде. Понятия «фитобиом», «микробиом», «фитомикробиом», «ризомикробиом» широ-

ко используются в зарубежной литературе экологического, лесохозяйственного, сельскохозяйственного профиля [5–8], а также медицинского, включая отечественные публикации [9, 10]. С 2016 г. в США выходит журнал с одноименным названием «Phytobiomes J.».

Проблемы симбиозообразования на техногенных отходах и их решение

Симбиоз – это широко распространённое общебиологическое явление, форма существования жизни. Истоки симбиотических отношений уходят в далёкое геологическое прошлое. Эндосимбиоз, представленный арбускулярной микоризой, существует более 400 млн лет и в настоящее время рассматривается в качестве предковой формы мутуалистических симбиозов высших растений и грибов [11, 12]. Пищевой мутуализм между ними считается ключевым компонентом, поскольку эти организмы диверсифицировались около 200 млн лет тому назад и образовали функционально облигатные ассоциации. У многих наследников псилозитовидных растений – первых покорителей суши (419–358 млн лет тому назад), к которым относятся современные растения отделов плауновидные, хвощевидные, папоротникообразные, голосеменные, сохранился факультативный характер их эндомикориз (ЭНМ). Бобово-ризобияльный эндосимбиоз, как тип мутуалистического партнёрства, возник позже, поскольку возраст бобовых меньше – около 60 млн лет назад. Появление эктомикоризы (ЭКМ) на корнях сосновых растений – старейшего семейства хвойных, датируется, благодаря окаменелостям, временем 156 млн лет тому назад. Разнообразие симбиозов присутствует не только на заповедных территориях, но и на нарушенных. Информации о том, как они формируются и как долго сохраняются в техногенной среде, пока немного. Например, на 40-летних рекультивированных золоотходах с нанесённым грунтом, а также гидроотвалах вскрыши рассыпного золота (Средний Урал), как и других техногенных экотопах, среди фитопоселенцев обнаружены орхидные растения [13, 14]. В лесных растительных сообществах и на закустаренном щучковом лугу золоотвала присутствовали *Malaxis monophyllos*, *Platanthera bifolia*, *Listera ovata*. Кроме них встречались и другие микотрофные виды, но все они относятся к группе слабомикотрофных растений, что свидетельствует об экстремальности экологических, в том числе эдафических условий. На исходном участке с золой орхидные

растения отсутствовали. На отвале вскрыши золота отмечена лишь *M. monophyllos* – мякотница однолистная, или стагачка однолистная. Её выживанию, безусловно, способствовала влажность, щелочная среда вскрыши из-за присутствия карбоната кальция. К карбонатным местообитаниям тяготеет большинство «краснокнижных» орхидей и мякотница не исключение. Однако на отвалах рассыпного золота, как и на участке с золой, она испытывает определённый «дискомфорт». Во-первых, растение относится к теневыносливым видам, а поверхность техногенных отходов хорошо освещена. Во-вторых, мякотница является высоко микотрофной, но корнеобитаемый слой на ТО микодифицитен. Микобионты корней – это несовершенные (примитивные) гетеробазидиальные грибы из семейств: *Sebacinaceae*, *Ceratobasidaceae* и *Tulasnellaceae*. Растения без них не живут, эндомикориза поставляет им питательные вещества, иногда на 100% [15], поэтому растение рассматривается как облигатный паразит. Накопление микоризообразователей происходит в зонах отмирания листьев, прикрывающих псевдобульбы, которые играют роль депозитария.

Процесс инфицирования корней мякотницы грибами происходит в специфических контактных зонах – мишенях, расположенных на корневых волосках [16], но минеральные частицы вокруг корней снижают доступность таких зон для микобионтов. Наибольшую степень микотрофности обнаруживают ювениальные и вергинальные растения, поэтому дефицит эндомикоризных несовершенных грибов, как и контактов для заражения, не способствуют микоризации корней.

Наряду с этим, *M. monophyllos* обнаруживает на ТО острую опылительную недостаточность. Как и другие орхидные растения – редкие древние представители флоры (появились в поздне меловую эпоху) [17], мякотница относится к растениям с облигатной ксеногамией, поэтому не способна к самоопылению, нуждается в перекрёстном переносе пыльцы с одного растения на другое с участием посредников – комаров, численность особей которых на открытых участках ТО мала. Поэтому формирование семенного фонда осложнено. Помимо этого, для прорастания семян необходимо наличие специализированных микосимбионтов семян, без которых последние не прорастают, но их тоже может не быть или они в дефиците. Для сохранности поселившихся на ТО краснокнижных растений можно осуществить их пересадку (предусмотрено ГОСТом) на целин-

ные участки, где биотические «услуги» могут быть осуществимы.

Известны также факты отрицательного влияния аэротехногенного загрязнения почв на развитие эндомикориз у других цветковых растений. Наибольшую токсичность проявляли тяжёлые металлы и сернистый ангидрид, при воздействии которых существенно подавлялось развитие ЭНМ, вплоть до полной стерилизации корневых систем и появления в ценопопуляциях безмикоризных растений [18]. Обилие мицелия в корнях снижалось в 2,7–3,5 раза в техногенных местообитаниях по сравнению с естественными участками [19].

Древесные растения: сосна обыкновенная и берёза бородавчатая, которые используются в ЛР, образуют симбиозы с корневыми симбионтами – макромицетами: у сосны их около 50 видов, у берёзы – около 30. Микоризность проявляют 40% всех известных высших грибов [20]. Под лесными насаждениями на ТО часто встречаются мухомор красный (*Amanita muscaria*), представители рода маслёнок (*Suillus*). В присутствии *S. tomentosus* на корнях сосновой лиственницы (*P. contorta* var. *latifolia*) могут образовываться бугорчатые микоризы, где поселяются азотфиксирующие бактерии с высокой нитрогеназной активностью [21]. Однако, несмотря на присутствие на ТО макромицетов, обеспечивающих доставку питательных элементов в корни, посадки саженцев обнаруживают замедление роста и развитие болезней, поскольку носят временный (сезонный) характер. В связи с этим, предпринимаются меры по увеличению числа посадочных мест, привлечению инновационных технологий искусственной колонизации корней саженцев микоризными грибами. С целью искусственного заражения в питомниках Западной Сибири, как и других регионах страны, используются споры, мицелий эктомикоризных грибов [22, 23], в том числе нескольких микобионтов [24]. Отселектированные штаммы ЭКМ – грибов родов *Amanita*, *Suillus*, *Cortinarius*, *Boletus* повышают приживаемость растений, ускоряют их рост, снижают поражаемость корней возбудителями болезней, но информации о состоянии микоризованных саженцев по мере их развития на ТО, недостаточно. Известно [25, 26], что в Предуралье и Южном Урале на вскрышных породах бурого угля и на хвостах горнодобывающей промышленности проявлялись изменения в анатомическом строении микориз сосны обыкновенной: регистрировались таниновые клетки, снижался

тургор клеток коры корней, что означало преждевременное старение микориз. Отмечалось [27], что в условиях хронического промышленного загрязнения лесов Центрального Прикамья типичные микоризные структуры сосны и берёзы заменялись на псевдомикоризы, в которых гифы гриба концентрировались внутри клеток корня, свидетельствуя о развитии паразитического симбиоза. В Республике Башкортостан аэротехногенное загрязнение почв негативно отразилось на состоянии растительного и грибного компонента [28]. Не исключено, что ухудшение состояния саженцев сосны в Сибирском регионе может быть связано с патологией микориз. Поскольку искусственное заражение сеянцев лесных культур ЭКМ требует немалых финансовых затрат, то возникает необходимость улучшения лесорастительных условий на ТО. С этой целью в практике ЛР в горнотаёжной зоне используются посеы донника белого, клевера розового гибридного, люцерны синегридной [29]. Поскольку люцерна отличается от клевера и донника слабой генетической устойчивостью к низким значениям рН [30], то на «кислых» отходах она развивается хуже, чем другие бобовые. Не случайно, на отвалах угледобычи на Урале [31] семена люцерны не вызревали. Химическая мелиорация отходов металлургического комбината (г. Новокузнецк) с применением обеззараженных известью осадков сточных вод способствовала 10-кратному повышению надземной биомассы люцерны по сравнению с исходным вариантом [32]. Подщелачивание среды, возможно, благоприятствовало вирулентности бактерий р. *Rhizobium*, особенно видов, обладающих факультативной инвазионностью [33]. Процессу инфицирования способствовали, вероятно, дайдзеин, генистеин, куместрол, нарингенин, поскольку эти вторичные метаболиты, являясь хемоаттрактантами, усиливают таксис бактерий к корням растений [34]. А содержание этих флавоноидов в наземной массе посевов бобовых растений (БР) в районе угледобычи на юге Кузнецкой котловины имеет тенденцию роста [2]. Поэтому можно предположить, что предпосылки для нодуляции БР в условиях ЛР есть. Но нужно иметь в виду, что число образуемых клубеньков может снижаться. Известно [35], что развитие травоядных тлей активизируют углеродный стресс в растениях-хозяевах, который приводит к уменьшению фотосинтетического углерода, необходимого всем партнёрам симбиоза БР, и ослаблению роста бактериоидов. Сокращение их количества вызывают бактериофаги [36–38], нематоды,

личинки клубенькового долгоносика, другие жуки [39, 40]. Снижение числа бактериоидов может быть вызвано их преждевременным старением под влиянием экотоксикантов по аналогии с солевым стрессом [41]. Поэтому симбиотрофное питание БР под лесными насаждениями, может быть ослабленным. Что касается заселения ТО редкими видами дикорастущих БР, семена которых мигрируют со смежных участков, то оно осложняется дефицитом в корнеобитаемом слое генетического разнообразия бактерий, набор которых в нарушенных экосистемах представлен видами р. *Rhizobium*, *Mesorhizobium* и *Phyllobacterium*, *Bosea* и *Tardiphaga* [42]. Поэтому симбиозообразование маловероятно. Ускорить формирование симбиоза БР можно попытаться путём инокуляции растений симбиотическими бактериями, в том числе предварительно выделенными с корней. Но следует иметь в виду, что искусственное заражение несколькими штаммами с повышенной нодуляционной конкуренцией не всегда продуктивно, поскольку сопровождается быстрой утилизацией ресурсов ниши и преждевременной гибелью бактерий (до образования симбиоза с БР) [43].

Заключение

В природной среде сожительство растений с корневыми мико- и бактериосимбионтами формировалось исторически долгое время. В результате их коэволюции появились новые структуры – эндо-, эктомикоризы и клубеньки. На ТО такие интеграции формируются вновь в обстановке дефицита мико- и бактериобионтов, в окружении экотоксикантов, которые негативно влияют на жизнедеятельность растений и их корневых резидентов, обуславливают преждевременное старение микориз и клубеньков. Механизм, позволяющий растениям рекрутировать (привлекать и отбирать) потенциальных симбионтов в такой ситуации неизвестен [44]. Пока существуют попытки привлечения активных штаммов ризобий для фиторемедиации территорий с полиметаллическим загрязнением [45, 46], разработки мультибиомного дизайна и генно-инженерных технологий [47, 48]. Лесообразовательный процесс долг и сложен, поэтому без привлечения новых знаний о симбиозе, как функциональной части фитобиома, быстрого успеха в ЛР не достичь. Внедрение инновационных технологий искусственной микоризации и нодуляции корней в практику ЛР будет способствовать симбиотрофному

питанию растений, восстановлению бывшего разнообразия симбиозов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН по бюджетному финансированию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-29-05086 мк).

References

1. Ufimtsev V.I., Manakov Yu.A., Kupriyanov A.N. Methodological recommendations for forest recultivation of disturbed lands at coal industry enterprises in Kuzbass. Kemerovo: KREOO "IRBIS", 2017. 44 p. (in Russian).
2. GOST R 57446-2017. National standard of the Russian Federation. Best available technology. Reclamation of disturbed land and land plots. Restoration of biological diversity. Moskva: Standardinform, 2019. 47 p. (in Russian).
3. Resolution of the Government of the Russian Federation of 07.03.2019 No. 244 "On amendments to the government Resolution of 10 July 2018 No. 800 "On land reclamation and conservation". 2 p. (in Russian).
4. Nevzorov B.P., Efremova G.V., Skalon N.V., Gagina T.N., Egorov A.G., Sushchev D.V., Onishchenko S.S., Maltseva A.T., Brel O.A., Teplova N.S., Pyashenko V.B., Luchnikova E.M. Problems of environmental protection of the Kemerovo region // Bulletin of the Kemerovo State University. Biology. 2008. No. 1. P. 7–12 (in Russian).
5. Vandenkoornhuysen P., Quaiser A., Duhamel M., Le Van A., Dufresne A. The importance of the microbiome of plant holobiont // New Phytol. 2015. V. 206. No. 4. P. 1196–1206. doi: 10.1111/nph.13312
6. Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. Plant growth-promoting Rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture // Frontiers in Plant Science. 2018. V. 9. Article No. 1473. P. 1–17. doi: 10.3389/fpls
7. Park K.H., Oh S-Y., Yoo Sh., Park H.S., Fong J.I., Lim Y.W. Successional change of the fungal microbiome pine seedling roots inoculated with *Tricholoma matsutake* // Front Microbiol. 25 September 2020. doi: 10.3389/fmicb.2020.574146SJFS20170609
8. Kerdraon L., Laval V., Suffert F. Microbiomes and pathogen survival in crop residues, an ecotone // Phytobiomes Journal. 2019. V. 3. No. 4. P. 246–255. doi: 10.1094/PBIOMES-02-19-0010-RVW
9. Sharma R., Gautam V., Bhardwaj R., Kohli S. Microbial siderophores in metal detoxification and therapeutics: recent prospective and applications // Plant Microbiome: Stress Response. Publisher: Springer, Singapore. 2018. P. 337–350. doi: 10.1007/978-981-10-5514-0-15

10. Shenderov B.A., Tkachenko E.I., Lazebnik L.B., Ardatskaya M.D., Sinitza A.V., Zakharchenko M.M. Meta-biotics – a new technology for the prevention and treatment of diseases associated with microecological disorders in the human body // *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2018. V. 151. No. 3. P. 83–92 (in Russian).
11. Shirokikh A.A. Joint evolution of plants and microorganisms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 2. P. 4–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2008-2-042095
12. Stark O.Yu., Borisov F.Yu., Zhukov V.A., Nemankin T.A., Tikhonovich I.A. Multicomponent symbiosis of legumes with useful soil microorganisms: genetic and evolutionary justification for use in adaptive crop production // *Ecological Genetics*. 2011. V. IX. No. 2. P. 80–94 (in Russian).
13. Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Lukina N.V., Rakov E.A. *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. on industrial dumps of the Middle Urals and in their natural habitat // *Scientific notes of Petrozavodsk State University. General Biology*. 2018. V. 8. No. 177. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.15393/uchz.art.2018.258
14. Lukina N.V., Ryazanova S.V. Features of micro-formation in technogenic ecosystems // *Ecosystems, their Optimization and Protection*. 2012. No. 7. P. 261–269 (in Russian).
15. Malysheva V.F. Heterobasidiomycetes, their position in the system of basidiomycetes and the problems of systematics // *Mycology and Phytopathology*. 2009. V. 1. No. 43. P. 20–32 (in Russian).
16. Tatarenko I.V. Search for microsymbiont is an important aspect of population biology of terrestrial orchids // *Protection and cultivation of orchids: Materials of the X international scientific and practical conference*. Minsk: Publisher A.N. Varaksin, 2015. P. 233–239 (in Russian).
17. Ramírez S.R., Singer R.B., Gravendeel B., Marshall C.R. Dating the origin of the Orchidaceae from a fossil orchid with its pollinator // *Nature*. 2007. V. 448. P. 1042–1045 [Internet resource] https://elementy.ru/novosti_nauki/430579 (Accessed: 17.04.2020).
18. Betekhtina A.A., Kondratkov P.V. Endomycorrhizae of segetal plants in conditions of technogenic pollution of various types // *Problems of global and regional ecology*. Yekaterinburg: Akademkniga, 2003. P. 15–18 (in Russian).
19. Betekhtina A.A., Veselkin D.V. Prevalence and intensity of mycorrhizal formation in herbaceous plants of the Middle Urals with different types of ecological strategies // *Ecology*. 201. No. 3. P. 176–183 (in Russian).
20. Voronina E.Y. Mycorrhizae in terrestrial ecosystems: ecological, physiological and molecular aspects of mycorrhizal symbioses // *Mycology Today*. 2007. V. 1. P. 142–234 [Internet resource] <https://www.researchgate.net/publication/292401212> (Accessed: 22.03.2021).
21. Paul L.R., Chapman B.K., Chanway C.P. Nitrogen fixation associated with *Suillus tomentosus* tuberculate ectomycorrhizae on *Pinus contorta* var. *latifolia* // *Annals of Botany Journal*. 2007. V. 99. P. 1101–1109. doi: 10.1093/aob/mcm 061
22. Vaishlya O.B., Vedernikova A.A. *In vitro* cultivation, identification and biochemical composition of some species of Homobasidiomycetidae forming ectomycorrhizae with coniferous trees // *Coniferous Boreal Zones*. 2009. V. XXVI. No. 1. P. 58–61 (in Russian).
23. Danchenko A.M., Bekh I.A., Vaishlya O.B. Innovations in modern forestry of the Tomsk region // *Bulletin of Tomsk State University. Ser. Biol*. 2010. No. 4. P. 81–89 (in Russian).
24. Geranina E.A. Prospects for the use of artificial mycorrhization in growing seedlings with a closed root system // *Proceedings of the Saint Petersburg Research Institute of Forestry*. 2014. No. 4. P. 49–58 (in Russian).
25. Faizova L.I., Zaitsev G.A. Features of mycorrhizal formation of Scots pine on the dumps of the Kumertau brown coal section // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. V. 14. No. 1 (6). P. 1565–1567 (in Russian).
26. Faizova L.I., Zaitsev G.A. Features of mycorrhizal formation of scots pine on the dumps of the Uchalinsky mining and processing plant // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013. V. 15. No. 3 (5). P. 1480–1482 (in Russian).
27. Selivanov I.A., Shkaraba E.M., Mekhonoshin L.E., Perevedentseva L.G. The reaction of cap mushrooms to environmental pollution // *Ecology and fruiting of macrofungi-symbiotrophs of woody plants*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992. P. 54–55 (in Russian).
28. Zaitsev G.A., Mukhametova G.M., Veselkin D.V. Features of the formation of Scots pine mycorrhiza in the conditions of industrial pollution // *Vestnik of the Orenburg State University*. 2009. V. 6. P. 137–139 (in Russian).
29. Biological land reclamation in Siberia and the Urals. Novosibirsk: Nauka, 1981. 113 p. (in Russian).
30. Trofimov I.T., Stupina L.A. Relation of agricultural crops to soil acidity and increase of their productivity // *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2006. No. 2 (22). P. 20–24 (in Russian).
31. Seraya G.P., Chibrik T.S. Viability of long-term grass coenopopulations depending on growing conditions // *Plants and industrial environment*. Sverdlovsk, 1985. P. 5–25 (in Russian).
32. Vodoleev A.S., Androkhanov V.A., Klekovkin S.Yu. Soil improvers: recultivation aspect. Novosibirsk: Science, 2007. 148 p. (in Russian).
33. Glyazko A.K., Ishchenko A.A., Filinova N.V. Bean-rhizobial symbiosis: some modern knowledge // *Bulletin of the Kharkiv national agrarian University. Biology series*. 2017. V. 3. No. 42. P. 6–22 (in Russian).
34. Nemereshina O.N., Gusev N.F. Influence of technogenic pollution on the content of flavonoids in plants of the norichnik family of the Middle Urals // *Vestnik of the Orenburg State University*. 2004. V. 10. P. 123–126 (in Russian).

35. Whitaker M.R.L., Katayama N., Ohgushi T. Plants-rhizobia interactions alter aphid honeydew composition // *Arthropod-Plant Interactions*. 2014. V. 8. No. 3. P. 213–220. doi: 10.1007/s11829-014-9304-5
36. Gill J., Abedon S.T. Bacteriophage ecology and plants // *APSnet Features*. Online. 2003. P. 1–17. doi: 10.1094/APSnetFeature-2003-1103 36
37. Appunu C., Dhar B. Existence and characteristics of Rhizobiophages in Soy Bean Grown Fields in India // *Asian Journal of Plant Sciences*. 2006. V. 5. No. 5. P. 818–824.
38. Liu J.I., Liu Z.X., Yu Y., Yaj Q., Yu L., Wang Q.Y. Biological characteristics of bacteriophages infecting three typic rhizobia of legume // *Journal of Applied Ecology*. 2019. V. 30. No. 8. P. 2775–2782. doi: 10.13287/j.1001-9332.201908.029
39. Davis E.L., Mitchum M.C. Nematodes. Sophisticated parasites of legumes // *Plant Physiology*. 2005. V. 137. P. 1182–1188.
40. Factors determining the symbiotic relationship of nodule bacteria with legumes [Internet resource] <https://helpics.org/3-85877.html> (Accessed: 06.04.21) (in Russian).
41. Serova T.A., Tsyganov V.E. Aging of the symbiotic nodule in leguminous plants: molecular-genetic and cellular aspects (review) // *Agricultural Biology*. 2014. No. 5. P. 3–15 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2014.5.3rus
42. Kuznetsova I.G., Sazanova A.L., Safronova V.I., Pinaev A.G., Verkhovina A.V., Tikhomirova N.Yu., Osledkin Yu.S., Belimov A.A. Genetic diversity of microsymbionts of Baikal species of chin (*Lathyrus*), pea (*Vicia*), acorn (*Oxytropis*) and astragalus (*Astragalus*) // *Agricultural Biology*. 2015. V. 50. No. 3. P. 345–352 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.345rus
43. Vorob'ev N.I., Provorov N.A. Quorum sensing and modulatory competitiveness of rhizobia in the infection of leguminous plants // *Agricultural Biology*. 2015. V. 50. No. 3. P. 298–304 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.298rus
44. Rúa M.A., Wilson E.C., Steele S., Munters A.R., Hoeksema J.D., Frank A.C. Associations between ectomycorrhizal fungi and bacterial needle endophytes in *Pinus radiata*: Implications for biotic selection of microbial communities // *Frontiers in Microbiology*. 2016. V. 7. No. 399. P. 1–18. doi: 10.3389/fmicb
45. Porteous-Moore F., Barac T., Borremans B., Oeyen L., Vangronsveld J., Lelie D., Campbell C.D., Moore E.R.V. Endophytic bacterial diversity in poplar trees growing on a BTEX-contaminated site: the characterisation of isolates with potential to enhance phytoremediation // *Systematic and Applied Microbiology*. 2006. V. 29. No. 7. P. 539–556. doi: 10.1016/j.syapm
46. Tang Y., Wang X., Li L., Li Z., Luo Y. Rhizobia and their bio-partners as novel drivers for functional remediation in contaminated soils // *Frontiers in Plant Science*. 2015. V. 6. No. 32. P. 1–11. doi: 10.3389/fpls
47. Quiza L., St-Arnaud M., Yergeau E. Harnessing phytomicrobiome signaling for rhizosphere microbiome engineering // *Frontiers Plant Science*. 2015. V. 6. No. 507. P. 1–11. doi: 10.3389/fpls.2015.00507
48. Gulevich A.A., Baranova E.N., Shirokikh I.G., Shirokikh A.A. Genetic engineering in solving unsolvable problems of soil remediation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 5–15 (in Russian). doi: 10.257750/1995-4301-2018-2-005-015

Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор)

© 2021. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с.,

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 РАН,

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

e-mail: kutyavinati@gmail.com

Проведён анализ существующей в России системы мониторинга поверхностных водных объектов. Обозначены методические и практические проблемы, возникающие при осуществлении мониторинга поверхностных вод суши (ПВС). Отмечено, что для совершенствования системы мониторинга ПВС в России, в первую очередь, необходимо актуализировать существующие программы мониторинга, более широко использовать современное оборудование, методы дистанционного зондирования Земли и информационные технологии. Перечень определяемых показателей следует составлять в соответствии с экологическими особенностями и характером использования водного объекта, учитывая новые виды загрязняющих веществ, поступающих в ПВС, и их трансформацию в водоёме. Наиболее актуальным в настоящее время остаётся вопрос нормирования воздействия загрязняющих веществ на водные экосистемы.

Ключевые слова: поверхностные воды суши, мониторинг поверхностных вод, программа мониторинга, государственный мониторинг, нормирование воздействия.

Current state and problems of monitoring of surface water bodies in Russia (review)

© 2021. Т. И. Кутявина¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636*

Т. Я. Ашихмина^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047*

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Scientific Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: kutyavinati@gmail.com

The analysis of the existing system of surface water monitoring in Russia is carried out. The methodological and practical problems that arise when monitoring the surface water bodies of the country are identified. It is noted that in order to improve the monitoring system of water bodies in Russia, first of all, it is necessary to update existing monitoring programs, more widely use modern equipment, methods of remote sensing of the Earth and information technologies. The list of indicators to be assessed when monitoring water bodies should be compiled in accordance with the environmental characteristics and the nature of the use of the water body, taking into account new types of pollutants entering water ecosystems, the transformation of substances in the reservoir, the probability of secondary water pollution by biogenic elements and toxic substances as a result of diffusion from pore solutions of bottom sediments. The current issue is the regulation of the impact of various substances on the state of aquatic ecosystems. Possible solutions to this issue are the development of regional standards for assessing the state of water bodies, the transition from a hazard-based approach to a risk-based approach to normalizing the impact on water bodies.

Keywords: land surface water, surface water monitoring, monitoring program, state monitoring, impact rationing.

Водные ресурсы являются одним из основополагающих и динамичных элементов национального богатства Российской Федерации (РФ). Сформировавшийся на их основе водохозяйственный комплекс во многом определяет социально-экономическую устойчивость, масштаб и направления развития страны. Водохозяйственная и экологическая безопасность – важнейшая составляющая национальной безопасности государства. В ближайшей и отдалённой перспективе её сохранение будет зависеть от бесперебойности водоснабжения отраслей экономики и состояния водных ресурсов [1]. Исходными данными для оценки состояния водных ресурсов и разработки мер по сохранению качества вод являются данные мониторинга поверхностных водных объектов.

Цель работы – провести анализ существующей в России системы организации мониторинга поверхностных вод суши, выявить основные проблемы и определить пути их решения.

Организация государственного мониторинга поверхностных водных объектов в России

В России мониторинг водных объектов начал проводиться с 50-х годов XX века, а централизованное планирование этих работ в масштабе государства началось с 1974 г. В настоящее время организация мониторинга возложена на Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы), осуществляется Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидрометом) с участием уполномоченных органов исполнительной власти субъектов РФ [2, 3].

Правовой основой всей водохозяйственной деятельности является Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ, Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ, Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года от 27 августа 2009 г. № 1235-р [2].

Согласно РД 52.24.309-2016, научно-методическое руководство сетью наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши (ПВС) возложено на подведомственные институты Росгидромета: по гидрохимическим и токсикологическим показателям – на Гидрохимический институт, по гидробиологическим показателям – на Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, по

гидрологическим показателям – на Государственный гидрологический институт.

В рамках ведения мониторинга ПВС общегосударственная гидрологическая сеть осуществляет регулярные наблюдения за состоянием ПВС в части количественных показателей, обеспечивает сбор, обработку, обобщение и хранение сведений, полученных в результате наблюдений, и обеспечивает представление данных проводимого мониторинга органам власти разных уровней [3]. Мониторинг осуществляется на водных объектах, находящихся в федеральной собственности, в собственности субъектов РФ, муниципальных образований, физических и юридических лиц [4]. В 2020 г. наблюдения за загрязнением ПВС по гидрохимическим показателям проводились на 1807 пунктах, по гидробиологическим показателям – на 202 пунктах [5]. Помимо мониторинга ПВС осуществляется также мониторинг состояния гидротехнических сооружений (ГТС). Сведения о ГТС вносятся в Российский регистр ГТС один раз в 3–5 лет. Ведение регистра ГТС возложено на Росводресурсы.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 219 от 10 апреля 2007 г. «Об утверждении положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов» мониторинг водных объектов, помимо федеральных организаций, должен проводиться также собственниками водных объектов и водопользователями. Они должны представлять в соответствующие территориальные органы Росводресурсы сведения, получаемые в результате наблюдений за водными объектами (морфометрическими особенностями) и их водоохранными зонами.

Для оценки качества природных вод в России используют систему предельно допустимых концентраций (ПДК) и интегральные индексы. В мировой практике такой подход называется опасность-ориентированным или концепцией «нулевого» риска [6].

Существующая в России система мониторинга позволила накопить довольно много данных о количестве и качестве водных ресурсов, состоянии ГТС страны. Ведение мониторинга ПВС и ГТС необходимо для разработки и реализации схем комплексного использования и охраны водных объектов, предотвращения их загрязнения и истощения, осуществления мер по ликвидации последствий данных явлений. Особо актуальны данные мониторинга ПВС при использовании водных объектов для питьевого водоснабжения

населённых пунктов. Тем не менее, получаемые в настоящее время данные не позволяют провести полную и объективную оценку состояния водных экосистем в России, разработать эффективную систему водоохраных мероприятий, необходимых для сохранения качества водных ресурсов страны. Это связано с наличием ряда проблем в сложившейся в России системе мониторинга ПВС.

Проблемы мониторинга поверхностных водных объектов в России и пути их решения

Объекты мониторинга. Водные объекты включают в себя несколько компонентов: водные массы, донные отложения (ДО), прибрежную зону и биоту. Все они взаимосвязаны и оказывают влияние на состояние водного объекта, поэтому в программу мониторинга ПВС необходимо включать отбор проб и анализ всех компонентов водной экосистемы, а при оценке состояния водного объекта учитывать физико-химические и гидробиологические закономерности формирования качества воды. Если в настоящее время данные о водных массах собираются регулярно и в достаточно больших объёмах, то мониторингу ДО и биоты не уделяется должного внимания [6–8]. При этом, именно в ДО аккумулируется большая часть органических и неорганических соединений, попадающих с водосборной территории в виде диффузного и сосредоточенного стока, и образующихся непосредственно в водоёме, что может стать причиной вторичного загрязнения водных масс биогенными элементами и различными токсикантами в результате диффузии из поровых растворов [7]. В связи с этим, анализ ДО и биоты необходимо обязательно включать в программы мониторинга ПВС.

Нормативы воздействия на окружающую среду. В России в качестве индикаторов химического загрязнения водной среды, ДО, гидробионтов используются превышения ПДК контролируемых показателей, а при их отсутствии – фоновых концентраций веществ для незагрязнённых акваторий, которые были определены при мониторинговых исследованиях [9]. Одна из причин, по которой не проводится в необходимом объёме мониторинг ДО – отсутствие в РФ утверждённых на федеральном уровне ПДК загрязняющих веществ (ЗВ) в ДО [7]. Решение этой проблемы – использование для оценки состояния ДО усреднённых значений фоновых концен-

траций определяемых компонентов и кларков в земной коре, а также нормативов, принятых в других странах. Перечень из 27 органических и 8 неорганических веществ, которыми могут быть загрязнены ДО и для которых существуют нормативы в разных странах мира, представлен в работе [8]. Метод оценки загрязнённости ДО приоритетными ЗВ, в первую очередь тяжёлыми металлами, предложен в работе [10]. Авторы предлагают рассчитывать удельный комбинаторный индекс загрязнённости ДО, класс качества и степень загрязнённости ДО путём сопоставления фактических концентраций с соответствующими им фоновыми значениями (региональными нормативами) ЗВ в ДО. В работе [11] по результатам исследования 90 водных объектов Республики Татарстан определены региональные фоновые значения и верхние пределы природного содержания нефтепродуктов в ДО, превышение которых свидетельствует о наличии загрязнения.

При отсутствии ПДК для многих ксенобиотиков авторами работы [6] предлагается использовать информационные технологии оценки опасности ксенобиотического, включая лекарственное, загрязнения воды. Авторы предлагают систему с использованием 14 международных и национальных баз данных, среди которых 10 являются легитимными по отношению к России, а также программу прогноза биологической активности соединений по их структуре (Prediction of Activity Spectra for Substances) [6]. В зарубежной практике для оценки и управления токсичными веществами в речном бассейне был разработан веб-инструмент RiBaTox [12], который также можно использовать при проведении мониторинга ПВС и нормировании качества вод в России.

Использование системы ПДК, несомненно, играет важную роль в оценке качества водных объектов, однако можно отметить и слабые стороны этого подхода. На сегодняшний день ПДК установлены лишь для малой доли известных веществ [13, 14]. Соединения, поступающие в водоём, подвергаются различным трансформациям, в результате которых могут образовываться зачастую более опасные вещества, чем исходные, а ПДК для этих вторичных продуктов часто отсутствуют [6]. При сравнении фактически определённых концентраций с ПДК обычно не учитывается общая нагрузка на экосистемы, характеризующаяся рассеянным загрязнением большим числом веществ, находящихся в низких (на уровне

фоновых или даже следовых) концентрациях, т. е. так называемыми микрозагрязнителями [13]. Для решения этой проблемы авторы работы [13] предлагают установить перечень приоритетных микрозагрязнителей, подлежащих обязательному контролю, и разработать соответствующую программу мониторинга. Также существенным недостатком является то, что существующие ПДК одинаковы для всех водных объектов страны, несмотря на огромное различие физико-географических, климатических и социально-экономических условий [6]. Для решения этой проблемы предлагается использование региональных нормативов качества вод и бассейновых допустимых концентраций веществ [15, 16], однако методика разработки региональных ПДК в России в настоящее время отсутствует [17].

Следует отметить, что при нормировании воздействия на водные объекты во многих странах применяется риск-ориентированный подход [18–20]. При его использовании для каждого ЗВ на основании информации о свойствах вещества определяются вероятность воздействия на живые организмы и возможные негативные эффекты такого воздействия, а уровень допустимого риска учитывает экономическое состояние предприятий с использованием принципа наилучших доступных технологий [6]. Возможно, переход от опасность-ориентированного к риск-ориентированному подходу поможет решить проблему регулирования качества ПВС в России. В целом можно отметить, что нормирование воздействия различных веществ на состояние водных объектов и их отдельных компонентов в настоящее время является актуальной нерешённой задачей, требует существенной научной и методической проработки.

Перечень определяемых показателей.

При формировании перечня показателей необходимо учитывать экологические особенности водного объекта и характер его использования, выбирая в каждом конкретном случае наиболее информативные показатели. В работе [6] при оценке качества вод рекомендуется учитывать не только общепринятые в России показатели (в основном неорганические поллютанты), но и приоритетные ЗВ, обращая внимание на географические, производственные и иные особенности региона, в котором проводится мониторинг, а также использовать опыт других стран в этой сфере регулирования. Например, в рамках реализации проекта SOLUTIONS в европейских странах большое внимание уделяется оценке

токсического влияния смесей ЗВ на гидробионтов [21, 22]. В Казахстане для оценки качества воды в водоёмах со смешанным загрязнением рекомендуется учитывать структурные переменные сообществ зоопланктона (численность, биомассу, индексы разнообразия, среднюю массу особи), а также данные о структуре видового доминирования, половой структуре популяций копепод и наличии особей с морфологическими аномалиями [23]. В РД 52.24.309-2016 отмечается, что, наряду с определением в ДО таких ЗВ, как хлорорганические пестициды, нефтяные и полициклические ароматические углеводороды, тяжёлые металлы, целесообразно определять и токсикологические показатели, а также расширять список определяемых в ДО ЗВ в зависимости от особенностей использования водных объектов и появления новых веществ и химических соединений, поступающих в водоёмы. Авторы работ [24, 25] подчёркивают необходимость включения в перечень показателей действующей программы мониторинга ПВС в России микропластика, авторы работ [26, 27] – численности цианобактерий (ЦБ) и содержание цианотоксинов в воде. Для оценки интенсивности и прогноза развития процессов эвтрофирования ПВС в перечень показателей целесообразно включить концентрацию пигментов, в первую очередь, хлорофилла *a*. Информация о концентрации хлорофилла *a* и её изменении во времени позволяет прогнозировать массовое развитие водорослей и ЦБ или «цветение» воды. Эти данные необходимы в целях информирования населения, проживающего вблизи водных объектов, а также обслуживающего персонала поверхностных питьевых водозаборов для принятия мер по очистке водозаборных сооружений от скоплений фитопланктона. В странах Европейского Союза в рамках выполнения Водной рамочной директивы концентрация хлорофилла *a* является регулярно отслеживаемым параметром [28, 29].

В некоторых случаях более информативными оказываются интегральные показатели. Например, для оценки загрязнения водных объектов, находящихся в зоне влияния Костомукшского горно-обогатительного комбината, наиболее информативным и надёжным оказался индекс загрязнения воды, рассчитанный по содержанию в воде K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Li^+ и Ni^{2+} и сравнению концентраций ионов с региональными ПДК [15]. Учитывая быстрое развитие дистанционных методов анализа информации с космических снимков, в перечень

определяемых показателей при мониторинге ПВС следует включить расчёт спектральных индексов, например, индекса концентрации хлорофилла *a* в воде и нормализованного вегетационного индекса. Однако, следует учитывать, что величины спектральных индексов могут отличаться в зависимости от региональных особенностей водных экосистем. В связи с этим, одним из актуальных направлений деятельности является разработка региональных алгоритмов оценки состояния ПВС по спектральным индексам.

Таким образом, перечень определяемых показателей не может быть постоянным, должен учитывать как особенности конкретного водного объекта и его состояние, так и развитие химической промышленности, и появление новых видов веществ, поступающих в ПВС.

Методическая и приборная база мониторинга. Для надёжной и эффективной оценки состояния вод необходимо использовать комплекс биологических, химических и токсикологических методов мониторинга [14], а также методов дистанционного зондирования с привлечением современного оборудования. Направления модернизации гидробиологических методов мониторинга, применяемых подразделениями Росгидромета, и первоочередные мероприятия, необходимые для развития государственного мониторинга ПВС по гидробиологическим показателям, предложены в работе [14]. В последнее время активно развиваются дистанционные методы мониторинга [30–32]. Привлечение этих методов для изучения водных экосистем позволит уменьшить финансовые затраты на проведение мониторинга ПВС и охватить большие площади исследования. Совершенствование системы космического мониторинга в рамках обеспечения функционирования и развития государственной наблюдательной сети, систем сбора и обработки данных является одной из задач Росгидромета на 2021 г. [33].

Проблема использования устаревшей приборной базы при мониторинге ПВС отмечена в работе [6]. В последнее время эта проблема успешно решается в рамках реализации федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» [5]. Российскими предприятиями разрабатываются надводные аппараты, предназначенные для измерений физических характеристик и отбора проб воды для химического анализа [34]. Использование подобных аппаратов

целесообразно и эффективно при проведении мониторинга охладительных водоёмов, каналов атомных электростанций (АЭС), верхних бьефов гидроэлектростанций и других промышленных водоёмов.

Программа и сеть мониторинга. В научной литературе предлагаются пути создания и модернизации программ мониторинга на государственном [35, 36], региональном [37], муниципальном [4] уровнях, а также на уровне отдельных отраслей производства. Для совершенствования системы управления водоохраной на федеральном уровне предлагается как расширение программ наблюдений в существующей системе и создание новых постов, особенно в зонах высокого риска [35], так и сокращение программ наблюдений, их изменение в зависимости от геохимических характеристик ландшафта, характера антропогенного воздействия и вида использования водного объекта. В работе [36], выполненной на базе Института озёроведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН), предложено провести модернизацию государственного мониторинга для крупнейших водоёмов России с площадью акватории свыше 1 тыс. км², выделить в мониторинге таких водоёмов две составляющие: базовую (с единой программой и перечнем показателей) и индивидуальную (с социально-ориентированной программой и перечнем показателей, наиболее актуальных для конкретного водоёма). В связи с ратификацией Россией Стокгольмской конвенции 2001 г. о стойких органических загрязнителях (СОЗ), было предложено включить СОЗ в обязательный перечень показателей базовой части государственного мониторинга крупнейших водоёмов [36]. На основе разработанной системы ранней диагностики экологического состояния водных объектов [38] в ИНОЗ РАН разработана методика экспресс-диагностики малых и средних водоёмов России, включающая оптимизированное минимальное количество измеряемых параметров за короткий промежуток времени в репрезентативные фазы гидрологического режима [39]. Предложены программы мониторинга водных объектов, используемых крупными предприятиями. Например, в работе [40] на примере Балтийской АЭС предложена унифицированная программа мониторинга водоёмов, используемых для технического водоснабжения АЭС, до ввода в эксплуатацию АЭС. В связи с высоким рыбохозяйственным статусом р. Неман, воды которой используются на АЭС, и добычей биологических ресурсов реки тремя государства-

ми (РФ, Литовская Республика и Республика Беларусь) особое внимание авторы уделили мониторингу водных биологических ресурсов, в частности, нерестовой миграции корюшки.

Сбор, обработка и анализ информации.

Первичные данные о состоянии водных ресурсов, полученные в ходе проведения мониторинга, часто остаются неиспользованными вследствие отставания методического обеспечения по обработке, обобщению и анализу результатов мониторинга [41, 42]. Для решения этой проблемы создаются новые программные продукты, геоинформационные системы (ГИС) и сетевые ресурсы. Например, для водных ресурсов Кемеровской области, крупного угледобывающего региона России, разработана информационно-аналитическая система геоэкологического мониторинга «Водные ресурсы» [43]. Достоинства системы заключаются в возможности анализа общей загрязнённости водных объектов и комбинировании ингредиентов для выработки гипотез о действующих вариантах формирования загрязнений, выявлении границ распространения отдельных ЗВ по водотоку путём деления на отдельные территориальные кластеры [43]. Основной недостаток использования системы «Водные ресурсы» заключается в определении качества воды только на основании результатов гидрохимического анализа и сравнения их с ПДК, без учёта токсикологических данных. В Калужской области для сбора и обработки данных мониторинга ПВС создан Территориальный информационно-аналитический ресурс «Информационно-аналитическая система «Экологический мониторинг» (<http://admoblkaluga.ru/ecology/>), использование которого позволяет проводить оценку ПВС, планировать мероприятия по сокращению нагрузки на водные объекты, информировать население о качестве воды в ПВС [44]. Для водоёмов и рек Сибири разработана специализированная ГИС, основанная на данных оптической и радиолокационной спутниковой съёмки с космических аппаратов Sentinel-1, 2 и Landsat-8 [45]. Использование данной ГИС позволяет изучать динамику песчаных наносов в русле рек и проводить мониторинг оледенения водохранилищ [45]. Геоинформационные системы применяются для оценки биопродуктивности водоёмов Центрального региона России [46], для инвентаризации водных объектов и создания водохозяйственной карты Калмыкии [47]. На общегосударственном уровне с 1 января 2014 г. в РФ введена в постоянную эксплуатацию автоматизиро-

ванная информационная система государственного мониторинга ПВС, в задачи которой входит сбор, хранение и обработка информации по водным объектам на уровне субъектов РФ, речных бассейнов и в целом по России, информационное обеспечение государственного контроля и надзора за использованием и охраной водных объектов, управление водохозяйственными системами бассейнов рек и др. [48]. Для получения оперативной информации о состоянии ГТС на водных объектах целесообразно создание системы автоматизированного ведения мониторинга ГТС. Необходимость создания такой системы для проведения своевременной оценки состояния ГТС и принятия решений о целесообразности ремонта, реконструкции, нового строительства, эксплуатации, консервации и ликвидации ГТС обоснована в работе [49].

Таким образом, можно отметить, что разработка и применение новых программных продуктов, ГИС технологий для анализа информации о ПВС – одно из самых актуальных и востребованных направлений развития мониторинга водных объектов. Уже созданы продукты, позволяющие решить ряд экологических задач, однако, разработанные ГИС чаще применяются на территории отдельных регионов РФ. Для более широкого их применения и внедрения в систему мониторинга ПВС России необходимо проводить апробацию разработанных программных продуктов на других территориях страны, проводить их корректировку с учётом региональных особенностей водных объектов.

Заключение

Мониторинг ПВС на государственном уровне проводится в России уже более 45 лет. За это время была создана крупная сеть наблюдательных пунктов на водных объектах, разработаны программы наблюдений и системы нормирования качества воды. Созданная система мониторинга позволила получить данные о состоянии ПВС и ГТС, о количестве и качестве водных ресурсов России. Тем не менее, многочисленные научные исследования последних 10 лет свидетельствуют, что существующая система мониторинга ПВС устарела, требует серьёзных изменений, учитывающих современное состояние водных экосистем и появление новых видов загрязнений. Такие проблемы, как наблюдения за большим количеством акваторий и обработка больших баз данных решаются с помощью дистанци-

онных методов анализа и за счёт использования информационных технологий. Однако ряд проблем до сих пор остаётся актуальным, в частности, нормирование воздействия различных веществ на состояние водных объектов и их отдельных компонентов, выявление новых видов ЗВ и разработка методов их определения. Дальнейшие исследования в области мониторинга ПВС должны способствовать решению этих проблем.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-5830.2021.1.5).

References

1. State Report "On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2017". Moskva: NIA-Priroda, 2018. 298 p. (in Russian).
2. Gostishchev V.D., Sakharov R.Yu., Kuzmichev A.A. Modern approach to state monitoring of surface water bodies // Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii. 2012. No. 1 (05). [Internet resource] http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec562-field12.pdf (Accessed: 18.02.2021) (in Russian).
3. Monitoring as an ecosystem research tool [Internet resource] <http://gis.krasn.ru/blog/content/monitoring-vodnykh-resursov> (Accessed: 15.03.2021) (in Russian).
4. Novokreshchenova R.M., Nikolaeva O.N. Relevance of environmental monitoring of municipal-owned water bodies // Interekspo GEO-Sibir. XV Mezhdunarodnyy nauchnyy kongress: Sbornik materialov v 9 tomakh. V. 4. Novosibirsk: SGUGiT, 2019. No. 2. P. 112–117 (in Russian). doi: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-112-117
5. Draft final report on the activities of Roshydromet in 2020 and tasks for 2021 [Internet resource] http://www.meteorf.ru/about/coordination/377/final/#DATE_FROM=01.01.2021&DATE_TO=31.12.2021&PAGEN_1=1&ID=377 (Accessed: 01.04.2021) (in Russian).
6. Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Voznyak A.A., Chiganova M.A. Modern problems of assessment, regulation and monitoring of surface water quality // Vodnoe khozyaystvo Rossii. 2018. No. 1. P. 47–59 (in Russian).
7. Ivanov D.V., Shagidullin R.R., Ziganshin I.I., Paymikina E.E., Marasov A.A., Malanin V.V., Khasanov R.R., Mustafina L.K. Monitoring of bottom sediments of the lower course of the Kazanka River // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii. 2018. No. 2 (14). P. 11–16 (in Russian).
8. Mikhaylova L.B., Stepanova N.Yu. The concept of developing standards for the content of pollutants and mixtures in bottom sediments and soils of freshwater objects of fisheries importance // Vestnik rybokhozyaystvennoy nauki. 2017. V. 4. No. 3 (15). P. 56–65 (in Russian).
9. Sokolova S.A. Rationing of anthropogenic substances for water quality assessment of water bodies // Kontrol kachestva produktsii. 2017. No. 4. P. 29–35 (in Russian).
10. Valiev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. Method of comprehensive assessment of bottom sediment contamination // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 2019. No. 9. P. 51–59 (in Russian). doi: 10.17076/lim1122
11. Ivanov D.V., Valiev V.S., Shagidullin R.R. Statistical approach to the determination of regional background concentrations of petroleum hydrocarbons in bottom sediments // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 2020. No. 9. P. 30–39 (in Russian). doi: 10.17076/lim1256
12. Kramer K.J.M., Sleuwaert F., Engelen G., Müller C., Brack W., Posthuma L. The RiBaTox web tool: selecting methods to assess and manage the diverse problem of chemical pollution in surface waters // Environ Sci. Eur. 2019. V. 31. Article No. 68. doi: 10.1186/s12302-019-0244-7
13. Zubrilov S.P., Rastrygin N.V. On the need to monitor surface water bodies for the content of micro-pollutants // Arctic: society, science and law: sb. statey / Ed. N.K. Kharlampeva. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2020. P. 270–281 (in Russian).
14. Buyvolov Yu.A., Bykova I.V., Lazareva G.A., Potyutko O.M., Uvarov A.G. Current state and prospects of development of water quality monitoring by hydrobiological indicators in Russia // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. 2016. V. XXVII. No. 2. P. 42–58 (in Russian). doi: 10.21513/0207-2564-2016-2-42-58
15. Lozovik P.A., Kulakova N.E. Methodological approaches to the assessment of water pollution in the area of operation of mining enterprises // Water Resources. 2014. V. 41. No. 4. P. 429–438 (in Russian). doi: 10.7868/S0321059614040117
16. Timofeyeva L.A., Frumin G.T. Problems of surface water quality norming // Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2015. V. 38. P. 215–229 (in Russian).
17. Oboldina G.A. Alternative approach to the methodology of environmental regulation // Vodnoe khozyaystvo Rossii. 2020. No. 6. P. 63–86 (in Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-4
18. Sarang A., Vahedi A., Shamsai A. How to quantify sustainable development: A risk-based approach to water quality management // Environmental Management. 2008. V. 41. P. 200–220. doi: 10.1007/s00267-007-9047-5
19. Hall J., Borgomeo E. Risk-based principles for defining and managing water security // Phil. Trans. R. Soc. A. 2013. V. 371. Article No. 20120407. doi: 10.1098/rsta.2012.0407
20. Borgomeo E., Hall J.W., Fung F., Watts G., Colquhoun K., Lambert C. Risk-based water resources planning: Incorporating probabilistic nonstationary climate uncertainties // Water Resour. Res. 2014. V. 50. P. 6850–6873. doi: 10.1002/2014WR015558

21. Altenburger R., Brack W., Burgess R.M., Busch W., Escher B.I., Focks A., Hewitt L.M., Jacobsen B.N., de Alda M.L., Ait-Aissa S., Backhaus T., Ginebreda A., Hilscherová K., Hollender J., Hollert H., Neale P.A., Schulze T., Schymanski E.L., Teodorovic I., Tindall A.J., de Aragão Umbuzeiro G., Vrana B., Zonja B., Krauss M. Future water quality monitoring: improving the balance between exposure and toxicity assessments of real-world pollutant mixtures // *Environ Sci. Eur.* 2019. V. 31. Article No. 12. doi: 10.1186/s12302-019-0193-1
22. Kortenkamp A., Faust M., Backhaus T., Altenburger R., Scholze M., Müller C., Ermler S., Posthuma L., Brack W. Mixture risks threaten water quality: the European Collaborative Project SOLUTIONS recommends changes to the WFD and better coordination across all pieces of European chemicals legislation to improve protection from exposure of the aquatic environment to multiple pollutants // *Environ Sci. Eur.* 2019. V. 31. Article No. 69. doi: 10.1186/s12302-019-0245-6
23. Krupa E., Barinova S., Romanova S., Aubakirova M., Ainabaeva N. Planktonic invertebrates in the assessment of long-term change in water quality of the Sorbulak wastewater disposal system (Kazakhstan) // *Water.* 2020. V. 12. Article No. 3409. doi: 10.3390/w12123409
24. Biritskaya S.A., Dolinskaya E.M., Teplykh M.A., Ermolaeva Ya.K., Pushnitsa V.A., Bukhaeva L.B., Kuznetsova I.V., Okholina A.I., Karnaukhov D.Yu., Zilov E.A. Microplastic water pollution over the littoral zone in the southern basin of Lake Baikal // *Baykalskiy zoologicheskii zhurnal.* 2020. No. 2 (28). P. 29–32 (in Russian).
25. Nikitin O.V., Latypova V.Z., Ashikhmina T.Ya., Kuzmin R.S., Nasyrova E.I., Haripov I.I. Microscopic particles of synthetic polymers in freshwater ecosystems: review and the current state of the problem // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 216–222 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-216-222
26. Kalinikova T.B., Gaynutdinov M.Kh., Shagidullin R.R. Methods for controlling the number of cyanobacteria in water bodies and cleaning drinking water from cyanotoxins // *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii.* 2019. No. 4. P. 33–45 (in Russian).
27. Sukharevich V.I., Polyak Yu.M. Global distribution of cyanobacteria: causes and consequences (review) // *Inland Water Biology.* 2020. No. 6. P. 562–572 (in Russian). doi: 10.31857/S0320965220060170
28. Dörnhöfer K., Klinger P., Heege T., Oppelt N. Multi-sensor satellite and *in situ* monitoring of phytoplankton development in a eutrophic-mesotrophic lake // *Science of the Total Environment.* 2018. V. 612. P. 1200–1214. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.219
29. Sòria-Perpinyà X., Urrego P., Pereira-Sandoval M., Ruiz-Verdú A., Peña R., Soria J.M., Delegido J., Vicente E., Moreno J. Monitoring the ecological state of a hypertrophic lake (Albufera of València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images // *Limnetica.* 2019. V. 38. No. 4. P. 457–469. doi: 10.23818/limn.38.26
30. Kutuzov A.V. Operational satellite monitoring of planktonic algae accumulations and quantitative assessment of their density // *Geographical Bulletin.* 2016. V. 3. No. 38. P. 160–168 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168
31. Molkov A.A., Kalinskaya D.V., Kapustin I.A., Korchemkina E.N., Osokina V.A., Pelevin V.V. On the prospects of remote assessment of hydrobiological characteristics of the waters of inland fresh water bodies based on the results of expeditions to the Gorky reservoir in 2016 // *Ekologicheskaya bezopasnost pribrezhnoy i shelfovoy zony morya.* 2017. No. 2. P. 59–67 (in Russian).
32. Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 3. P. 36–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
33. Draft Declaration of the goals and objectives of Roshydromet for 2021 [Internet resource] http://www.meteorf.ru/about/coordination/377/final/#DATE_FROM=01.01.2021&DATE_TO=31.12.2021&PAGEN_1=1&ID=377 (Accessed: 01.04.2021) (in Russian).
34. Nikitskiy A.Yu., Sirenko A.E., Yablokova Yu.V. Autonomous surface vehicle “Chomga” for monitoring water areas // *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii.* 2018. No. 1 (40). P. 95–98 (in Russian).
35. Venitsianov E.V. Current issues of improving the water resources protection management system // *Vodnoe khozyaystvo Rossii.* 2016. No. 4. P. 86–102 (in Russian).
36. Rummyantsev V.A., Kryukov L.N. Relevance of optimization of state monitoring of the largest reservoirs of Russia on the example of Lake Ladoga // *Uchenye zapiski RGGMU.* 2017. No. 48. P. 110–119 (in Russian).
37. Tikhomirov O.A., Pakhomov P.M. Formation of monitoring subsystems ecological and hydrochemical state of regional water bodies // *Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry.* 2017. No. 2. P. 140–151 (in Russian).
38. Rummyantsev V.A., Ignateva N.V. The system of early diagnosis of environmental crisis situations in water bodies. Sankt-Peterburg: VVM, 2006. 152 p. (in Russian).
39. Pozdnyakov Sh.R., Ignateva N.V. The concept of the development of a modern system for assessing the ecological state of water bodies // *Sustainable development of regions: experience, problems, prospects: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Kazan: Akademiya nauk Respubliki Tatarstan, 2017. P. 331–336 [Internet resource] <https://elibrary.ru/item.asp?id=34979813> (Accessed: 22.04.2021) (in Russian).
40. Luneva E.V. Development of a unified program for environmental monitoring of natural water bodies used for the technical water supply of the NPP before its commissioning (on the example of the Baltic NPP) // *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti.* 2015. No. 3. P. 78–86 (in Russian).

41. Zhuk V.N., Varlamov E.N. Foreign experience in surface water monitoring // *Ecology and Industry*. 2019. No. 2. P. 113–119 (in Russian). doi: 10.35477/2311-584X.59.113-119
42. Shabanov V.V., Markin V.N. Monitoring of water bodies in modern conditions. Moskva: Izdatelstvo RGAU-MSKhA, 2015. 151 p. (in Russian).
43. Schastlivtsev E.L., Yurkina N.I., Kharlampenkov I.E. Information and analytical system for geoecological monitoring of water resources in the coal-mining region // *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No. 2. P. 157–164 (in Russian).
44. Molodyk A.D., Marin V.P., Manshina I.V., Shoshina R.R., Vaganov G.A., Korzhavyi A.P. Concept of a target regional system for monitoring surface water bodies // *Naukoemkie tekhnologii*. 2019. V. 20. No. 4. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.18127/j19998465-201904-08
45. Dontsov A.A., Sutorikhin I.A. Specialized geoinformation system for automated monitoring of rivers and reservoirs // *Vychislitelnye tekhnologii*. 2017. V. 22. No. 5. P. 39–46 (in Russian).
46. Moiseenko T.I., Gapeeva M.V., Rogov A.V. Assessment of biological productivity of water bodies using GIS [Internet resource] <http://zhurnal.ape-re-larn.ru/articles/2006/114.pdf> (Accessed: 11.03.2021) (in Russian).
47. Novikova N.M., Ulanova S.S. Geoecological monitoring of water bodies in Kalmykia using information technologies // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki*. 2007. No. 4. P. 106–108 (in Russian).
48. FGIS: Automated Information System for State Monitoring of Water Bodies of the Russian Federation [Internet resource] <https://portal.eskgov.ru/fgis/267> (Accessed: 05.03.2021) (in Russian).
49. Volynov M.A., Zhezmer V.B., Sidorova S.A. Methods of analysis and processing of monitoring data for hydraulic structures of the reclamation complex // *Prirodoobustroystvo*. 2017. No. 1. P. 79–86 (in Russian).

Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор)

© 2021. А. С. Олькова¹, д. б. н., доцент,

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 РАН,

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

e-mail: morgan-abend@mail.ru

Согласно принципам биотестирования предполагается, что различия в ответных реакциях подопытных организмов будут обусловлены только действием спектра химических веществ, присутствующих в пробе и отсутствующих в контрольной среде. Однако в реальных условиях формирование результата биотестирования остаётся многофакторным сложным процессом. Первая группа факторов зависит от свойств тестируемой среды: качественного и количественного химического состава, его стабильности, присутствия и взаимодействия биогенных и потенциально токсичных веществ. Во-вторых, рассмотрены зависимости результатов биотестов от выбранного тест-организма и его ответных реакций. Третья группа факторов формируется самим исследователем и включает: условия содержания и состояние тест-организмов на момент выполнения опыта, выполнение требований к технике и условиям эксперимента и другие субъективные аспекты. Мировые тенденции в сфере биодиагностики состояния окружающей среды направлены на унификацию и стандартизацию методов и технологий проведения биотестов с учётом множества факторов, способных модифицировать итоговый результат биоанализа. Представленный материал может использоваться при интерпретации результатов биотестирования природных и техногенных сред.

Ключевые слова: биотестирование водных сред, тест-организмы, факторы токсичности, стандартизация условий проведения биотестирования.

Factors of obtaining representative results of bioassay of aquatic environments (review)

© 2021. A. S. Olkova¹ ORCID: 0000-0002-5798-8211^{*}

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0002-6611-8349^{*}

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,

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

e-mail: morgan-abend@mail.ru

The principles of bioassay state that differences in the responses of experimental organisms are due only to the action of the spectrum of chemicals present in the sample and absent in the control environment. However, under real conditions, the formation of a bioassay result is a multifactorial complex process. The first group of factors depends on the properties of the tested medium: qualitative and quantitative chemical composition, its stability, the presence and interaction of biogenic and potentially toxic substances. Secondly, the dependences of the biotest results on the selected test organism and its responses are considered. The third group of factors is formed by the researcher himself and includes: the maintenance conditions of the test culture, the state of the test culture at the time of the experiment, compliance with the requirements for the laboratory base, compliance with the experimental technique and other subjective aspects. World trends in the field of biodiagnosics of the state of the environment are aimed at unification and standardization of methods and technologies for conducting bioassay, taking into account many factors that can modify the final result of bioanalysis. The presented material can be used to interpret the results of bioassay of natural and man-made environments.

Keywords: bioassay of aquatic environments, test organisms, toxicity factors, standardization of conditions for bioassay.

Методы биотестирования заслуженно заняли своё место в инструментарии экологических работ, поскольку способствуют обнаружению низких доз загрязняющих веществ (ЗВ) [1, 2], выявлению эффектов новых токсикантов и их смесей [3], проведению экологического мониторинга в соответствии с международными и национальными директивами по охране окружающей среды [4, 5]. Совершенствование методологии биотестирования направлено на максимальный учёт факторов, влияющих на реакции тест-организмов, а, значит, и на заключение о токсичности [6]. Данные факторы подразделяются на:

- параметры исследуемой водной среды, такие как стабильность её качественного и количественного химического состава, концентрации как биогенных, так и потенциально токсичных соединений, возможное взаимодействие веществ;

- факторы, связанные с выбранным тест-организмом и методом биотестирования, включая тест-функцию и её характер (биохимический, физиологический, морфологический, поведенческий);

- условия, формируемые исследователем – исполнителем процедур биотестирования: параметры содержания культур, их характеристики на момент проведения серии опытов, выполнение требований к лабораторным условиям, соблюдение техники эксперимента и многое другое.

Цель данной работы – анализ и систематизация факторов, влияющих на результат определения степени токсичности водных сред с помощью тест-организмов.

Свойства тестируемой среды и её компонентов

Физические и физико-химические свойства молекул токсикантов, влияющие на их токсичность. В водных средах все химические вещества могут потенциально влиять на жизнедеятельность живых организмов. Естественные компоненты природной воды составляют её химическую «матрицу», многие части которой являются необходимыми биогенными элементами, либо эссенциальными элементами, обладающими значительной биологической ролью для представителей биоты. Превышение концентрации веществ и элементов относительно природного фона или поступление в среду обитания химических соединений, не свойственных данной экосистеме составляет суть проблемы загрязнения

окружающей среды. В таблице 1 обобщены основные свойства химических веществ, обуславливающих их взаимодействие с целостным организмом и молекулами-биомолекулами токсикантов [7–10].

Безусловно, рассмотренные свойства молекул токсикантов влияют на их токсичность в совокупности с другими факторами: дозой и временем контакта с организмами. Кроме того, абиотические условия проведения эксперимента влияют на биодоступность токсикантов, и, следовательно, на результат биотестирования.

Физико-химические свойства тестируемой водной среды и биодоступность токсикантов. Методологическим преимуществом биотестирования для диагностики наличия загрязнения является то, что такие важные параметры, как освещённость, температура, суточные и сезонные колебания физических и физико-химических параметров водной среды, устраняются благодаря постановке эксперимента в контролируемых условиях. Однако, многие особенности тестируемой водной среды являются её неотъемлемой частью и модифицируют действие потенциально токсичных веществ (табл. 2).

Перечисленные свойства водной среды влияют на проявление токсичности ЗВ через процессы формообразования, сорбции и десорбции, окислительно-восстановительных реакций, процессов осаждения и соосаждения элементов. Различное сочетание таких физико-химических параметров, как уровень рН и жёсткость также существенно модифицируют токсичность веществ [11].

Так, известно, что истинно растворённые формы металлов и микроэлементов – аква-ионы, ионные пары, низкомолекулярные органические соединения, включающие в состав элемент, – обладают максимальной биодоступностью, а соответственно и токсичностью для живых организмов [12]. И напротив, высокомолекулярные органоминеральные вещества, прочные хелатные комплексы, а также формы металлов с низкой растворимостью не являются биодоступными, следовательно, не приводят к опасным токсическим эффектам у подопытных организмов [13].

Комплексообразование за счёт лигандов органического вещества – это один из основных механизмов снижения биодоступности и причина низкой токсичности «связанных» элементов. Известно, что 1 мг/л органического вещества взаимодействует с 4,4 мкг/л условного металла [14]. Интересен факт, что орга-

Таблица 1 / Table 1

Физические и физико-химические свойства молекул токсикантов и их токсичность
Physical and physicochemical properties of toxicant molecules and their toxicity

Свойства молекул Т* Properties of Т* molecules	Механизм взаимодействия молекул Т и БМ* The mechanism of interaction of T and BM* molecules	Примеры The examples
Размер молекулы и молекулярная масса Molecule size and molecular weight	От размера молекулы Т зависит способ его проникновения в клетки организма: от простой диффузии для наименьших молекул и частиц (ионы неорганических веществ) до активного белкового транспорта высокомолекулярных соединений (ВМС)	Низкомолекулярные соединения (газы CO, CO ₂ , NH ₃) легче проникают в организм и распределяются в нем. Однако, липофильные ВМС способны проявлять высокую токсичность за счёт проникновения через фосфолипидную оболочку клеток и образование прочных связей Т-БМ
Изомерия. Пространственная организация изомеров вещества / Isomerism. Spatial organization of isomers of a substance	Ряд веществ может нарушать пространственную координацию БМ. Другие соединения образуют комплексы Т-БМ с последующими эффектами, зависящими от концентрации Т, прочности комплекса Т-БМ, важности БМ для жизнедеятельности организма	Изомеры неорганических веществ (фосфорные кислоты) и низкомолекулярных органических веществ (дихлорэтан) действуют неспецифически, проявляя одинаковую токсичность. Напротив, изомеры ВМС (синтетический инсулин) значительно различаются по токсичности, действуя специфически на БМ
Растворимость в воде и жирах Solubility in water and fats	В клетках и большинстве органов чередуются водные и липидные барьеры. Это универсальный механизм защиты организма от проникновения и распространения Т. Поэтому наиболее опасными являются вещества, способные растворяться как в воде, так и в липидах	Хорошо растворимые в воде хлорид и нитрат бария более токсичны по сравнению с малорастворимым сульфатом бария. Растворимость органических соединений в жирах увеличивается в ответ на возрастание молекулярной массы, что приводит к увеличению токсичности (ряд от метанола к октанолу)
Стабильность и химическая активность веществ Stability and reactivity of substances	Стабильность вещества в окружающей среде способствует его пространственному распространению с загрязнением большой площади. Химически активные вещества производят локальные нарушения, действуя как сильные окислители или восстановители	Пестициды первых поколений отличались высокой стабильностью, что привело к их распространению по всей Земле и явлениям биоаккумуляции. Современные пестициды сочетают в себе химическую активность и нестойкость, приводя к локальному загрязнению продуктами их трансформации
Химическая связь Т-БМ Chemical bond Т-БМ	Способности молекул к ионизации, поляризации, особенности внешних орбиталей электронов приводят к разнообразию химических связей Т-БМ	Ионные и ковалентные связи Т-БМ наиболее прочны и опасны (фосфорорганические соединения + ацетилхолинэстераза). Токсичность других комплексов Т-БМ зависит от дозы вещества и скорости его биотрансформации

Примечание: Т – токсикант, БМ – биологическая молекула.
Note: T is a toxicant, BM is a biological molecule.

Таблица 2 / Table 2

Влияние свойств тестируемой водной среды на биодоступность и проявление токсических эффектов загрязняющих веществ (ЗВ) / Influence of the properties of the tested aquatic environment on bioavailability and the manifestation of toxic effects of pollutants

Параметр Parameter	Влияние на биодоступность и токсичность ЗВ / Influence on the bioavailability and toxicity of substances	Исключения Exceptions
Взвешенное вещество Suspended matter	Снижение токсичности за счёт адсорбции и абсорбции растворённых ЗВ	Гидробионты с фильтрующим типом питания поглощают ЗВ вместе со взвесями
Вещества комплексообразователи Complexing agents	Снижение токсичности коррелирует со степенью химического сродства ЗВ и комплексообразователя, а также стабильностью новых комплексов	Имеются данные о повышении токсичности некоторых хелатных комплексов металлов, например, фульватных комплексов ртути
Жёсткость воды Hardness of water	Ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} снижают токсичность, уменьшая проницаемость биомембран. Также токсичность уменьшается, если ЗВ образует плохо растворимые соединения с ионами жёсткости, например, карбонатные комплексы	Многие органические ЗВ не взаимодействуют с ионами в жёсткой воде и/или проникают в организм путём активного транспорта
Уровень pH среды pH of the medium	Количество лабильных токсичных форм большинства неорганических веществ растёт при снижении pH	Реакция среды может выступать как фактор токсичности. Критические и оптимальные уровни pH видоспецифичны
Растворённый кислород Dissolved oxygen	При недостатке O_2 токсичность ЗВ возрастает из-за дыхательного стресса гидробионтов, кроме того, восстановленные формы многих элементов становятся токсичнее	Оптимальный уровень кислорода в воде способствует ослаблению токсических эффектов ЗВ. Критические уровни содержания растворённого кислорода в воде видоспецифичны
Полизагрязнение Polypollution	Токсичность ЗВ может как повышаться, так и снижаться за счёт явлений коергизма и псевдокоергизма	Вещества, не взаимодействующие в водной среде и во внутренних биосредах организма, не влияют на эффекты друг друга

ническое вещество в пресных водах обладает большим протекторным действием, чем его аналогичное содержание в морской воде [15].

Низкий уровень pH водной среды или почвенного раствора на фоне высокого содержания гуминовых веществ, особенно фульвокислот, приводит к увеличению содержания ионных форм металлов, что крайне опасно для гидробионтов [16, 17]. В биотестах на *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg показано, что увеличение лабильности токсичных элементов приводит к повышению острой и хронической токсичности вод и экстрактов из донных отложений, например, по показателю генотоксичности для *Chironomus riparius* Meigen [18].

Встречаются и противоположные сведения. Показано, что токсичность растворимых солей хрома и никеля для индийского карпа значительно выше при высоком значении pH (9,0 ед.), чем при низком (6,0 ед.), кроме того,

токсическое действие данных тяжёлых металлов снижается в жёсткой воде [19].

В большинстве протоколов биотестирования предусмотрено измерение значений pH, температуры среды, концентрации растворённого кислорода [20–24]. Значение этих факторов затем учитывается при интерпретации результатов.

Контаминация веществ и их совместное действие. Тестируемая среда – это многокомпонентная система, в которой невозможно исключить контаминацию множества природных веществ и соединений антропогенного происхождения [3, 25]. Совокупность эффектов веществ при их совместном действии, без подразделения по механизмам действия, называют коергизмом [7]. Истинный коергизм включает в себя простую суммацию эффектов (аддитивный синергизм), усиление действия веществ друг другом (потенцирующий синергизм) и антагонизм. В водной среде вещества

ещё до аппликации или проникновения в живой организм могут адсорбироваться на поверхности каких-либо частиц, осаждаются, взаимодействовать между собой, изменять химическую форму в зависимости от параметров природного раствора (температура, рН, концентрация минеральных солей и т. д.). Модификация токсичности веществ вследствие таких процессов называется псевдокоергизмом. Такие процессы часто повышают устойчивость экосистем к загрязнению.

Механизмы истинного коергизма основаны на изменении токсикодинамики веществ при совместном поступлении в организм. Например, в длительных экспериментах на моллюсках *Mytilus galloprovincialis* продемонстрировано смягчение ответных реакций, происходящих в лизосомах организмов, за счёт антагонизма пестицида хлорпирифоса и никеля [26].

Соотношения токсичных веществ, их комбинации, а иногда и длительность эксперимента также влияют на итоговые биологические эффекты смесей [27, 28]. В тестах на *Oreochromis niloticus* (нильская тилapia) показано, что смесь цинка и меди приводит к синергизму их действия, но при соотношении 1:1 наблюдается антагонизм этих металлов и снижение смертности рыб [29].

Анализ факторов, действующих на тест-организмы со стороны тестируемой среды и её компонентов, приводит к выводу, что чаще всего нельзя выделить одно свойство, которое бы объясняло токсичность. Именно поэтому в методологии биотестирования часто используют термин «интегральная токсичность», которая формируется совокупностью действующих факторов.

Факторы чувствительности организмов к химическим веществам

Формирование ответных реакций на токсическое воздействие у разных биологических видов. В молекуле ДНК, носители генетической информации, закодированы физиологические, морфологические, биохимические и все другие видовые особенности, которые проявляются в ходе жизни и развития организма, определяя в том числе и взаимодействия «токсикант-биологическая мишень». Вторым принципом формирования разных по этиологии и силе проявления реакций организмов на загрязнение среды обитания является снижение чувствительности организмов по мере усложнения их эволюционно

обусловленной организации. Эту позицию объясняет то, что повышение организованности биологического вида включает в себя и совершенствование токсикологических барьеров [8, 30, 31]. Встречаются исключения из этого базового принципа. Так, в исследовании детоксикации фосфорорганических и N-метилкарбаматных пестицидов показано, что печень крысы (*in vitro*) обладает большим детоксикационным потенциалом, чем образцы клеток печени человека [8].

В биотестировании ориентируются на различия в чувствительности к токсикантам у разных видов и выделение самых отзывчивых к воздействию организмов является главным принципом разработки информативных биотестов. Также систематически далёкие друг от друга виды принято использовать в экологических исследованиях для определения наиболее уязвимой группы организмов при сложившемся загрязнении. Так формируется «батарея биотестов», которая включает минимум три биотеста с использованием разных организмов. Часто используют сочетания низших ракообразных, одноклеточных водорослей и высших водных растений [32, 33].

Механизмы внутривидовой чувствительности организмов. Генетический полиморфизм, то есть существование в одной популяции двух и более резко различающихся аллелей одного и того же гена, – это механизм и первопричина многих межиндивидуальных различий организмов одного вида [34]. Например, известно, что ген цитохрома человека P450 (CYP2D6) обладает высокой полиморфностью, что приводит к широким этническим и межиндивидуальным различиям в метаболизме токсикантов [35].

Примером из области биотестирования могут служить белые лабораторные мыши, как правило гибриды подвидов *Mus musculus domesticus* и *Mus musculus musculus*. Их популяции являются одними из наиболее часто используемых тест-систем для выявления и изучения различных эффектов, в том числе различий токсичности веществ на внутривидовом уровне. С помощью генетически гетерогенной популяции мышей показано, что современные пищевые добавки могут обладать потенциальной опасностью, обнаружение которой осложняется внутривидовой чувствительностью к определённому веществу только части популяции [36].

Частный случай генетически обусловленной индивидуальной чувствительности к веществам – это различия, связанные с по-

лом. Они могут формироваться за счёт гормональных особенностей, разного соотношения жировых и водных фракций у самцов и самок, специфических ферментативных отличий, свойственных биологическому виду. Так, кожа спины самок крыс примерно в два раза более проницаема для мочевины, бензойной кислоты и кортизона, чем кожа самцов [7].

Следующая категория причин индивидуальной чувствительности организмов не связана с генетическими особенностями. К ним относят возраст, массу тела, влияние беременности (для млекопитающих) или болезни, годовые и суточные ритмы, регион обитания (для обитающих в естественных условиях организмов), питание. Есть данные, что снижение метаболической активности печени и почечной экскреции у очень молодых или очень старых особей может усилить химическую токсичность веществ [37]. Также вариабельность результатов биотестов может быть вызвана даже незначительной разницей в возрасте тест-организмов. Например, при проведении опытов с использованием мелких членистоногих коллембол [24] разница в возрасте особей в 1 сутки уже влияет на итоговый результат биотестирования, тогда как разница температуры проведения опыта в пределах 1 °C не имеет ощутимого эффекта [38].

При проведении биотестирования большой разброс индивидуальной чувствительности к токсикантам является фактором, снижающим точность и воспроизводимость результатов. Поэтому на роль тест-организмов разработчики биотестов часто выбирают организмы относительно низкого эволюционного уровня, у которых гетерогенность свойств разных особей минимальна [2, 39, 40].

Условия проведения биотестирования также являются факторами получения объективных результатов биотестирования, формируемых самим исследователем. Для достижения упорядоченности и унификации процедур биотестирования требуется разработка правил, положений, алгоритмов для всеобщего применения, объединяемых в понятие «стандартизация» [40–43]. В области биотестирования стандартизацию можно условно разделить на два направления: стандартизация культур тест-организмов, включая условия их культивирования и/или содержания, и стандартизация условий испытаний.

Стандартизация тест-культур связана с трудностями, исходящими из сути работ с живыми организмами, которые своей генетической изменчивостью, наличием биоритмов

и других факторов, неминуемо создают вариативность своих ответных реакций на токсичные вещества. Например, при сравнении культур одного биологического вида в двух разных лабораториях, можно обнаружить, по меньшей мере, морфологические отличия особей данных искусственных популяций [44, 45].

В современной методологии биотестирования используются два основных приёма стандартизации тест-культур. Во-первых, определение вида используемого организма и дальнейшее поддержание чистоты монокультуры. Это условие имеет большое значение, поскольку разные виды одной систематической группы часто проявляют различную чувствительность к токсикантам. Например, цианобактерии *Nostoc muscorum* Ag., *N. paludosum* Kütz, и *N. linckia* (Roth) Born. et Flah различаются по устойчивости к фосфорсодержащим токсикантам (метилфосфоновой кислоте и гербициду Глифосат) [46].

Во-вторых, поддержание чувствительности культуры организмов к модельному (эталонному) токсиканту на необходимом уровне. К модельному токсиканту предъявляются требования, обоснованные задачами его использования: вещество должно быть стойким в водной среде, количественно определяемым в растворе, минимально опасным для оператора анализа [1, 2, 39]. В России чаще всего применяют соли тяжёлых металлов (сульфат меди, дихромат калия, сульфат цинка). За рубежом спектр эталонных токсикантов гораздо шире. Например, в работе [42] указано, что в руководящем документе США (1994 г.) предлагается использовать следующие соединения в качестве эталонных токсикантов: хлорид натрия (NaCl), хлорид калия (KCl), хлорид кадмия (CdCl₂), сульфат меди (CuSO₄), додецилсульфат натрия и дихромат калия (K₂Cr₂O₇). Также в научных работах можно встретить использование в качестве токсикантов лаурилсульфата натрия, фенола, хлороформа, эндосульфана, хлорида аммония, фторида натрия, этилового спирта и других веществ [47–51].

Проблему обеспечения лабораторий биотестирования стандартизированными тест-культурами учёные МГУ им. М.В. Ломоносова предлагают решать через формирование единого национального банка тест-культур, который гарантировал бы соответствие тест-культуры заданным критериям [42]. Однако, стандартизированная культура быстро теряет свои качества и пригодность к биоанализам в силу различий в химическом составе

культивационных вод, использования даже незначительных вариаций в приёмах культивирования организмов и вследствие действия на них других абиотических и биотических факторов. Нами предлагается проводить контроль пригодности тест-культур к биоанализам на базе каждой испытательной лаборатории по расширенному перечню здоровья тест-организмов [44, 45].

Стандартизация условий культивирования тест-организмов. Создание экологического оптимума абиогенных и биогенных факторов позволяет поддерживать высокую чувствительность культуры, а также нивелировать сезонные колебания состояния тест-организмов. Для биотестирования в основном используются гидробионты, для которых наиболее важными параметрами являются химический состав культивационной воды, а также его стабильность, температурный и световой режим, биогенные параметры, такие как плотность популяции, вид и периодичность кормления, отсутствие организмов-антагонистов [39, 47, 52].

В качестве культивационной среды в настоящее время используют как природные воды, обеспечивающие организмы макро- и микроэлементами, так и искусственные среды, разработанные не только для растений, но и для рыб, ракообразных, хирономид и других организмов [23, 42]. Например, получила распространение среда М4, предложенная для *D. magna*, включающая в свой состав макро- и микроэлементы, а также витамины [53].

При сравнении результатов биоанализов, выполненных с использованием одного и того же тест-организма, необходимо придерживаться одинаковых протоколов испытаний, а также условий содержания культур. Например, только для культуры *D. magna* международными организациями по охране окружающей среды рекомендовано несколько разных методик [21–23, 54]. Алгоритмы этих документов могут отличаться в части плотности посадки организмов в среду, светового периода, вида корма, продолжительности теста и других важных параметров, что, в свою очередь, приводит к разным ответным реакциям у представителей одного и того же биологического вида [52].

Заключение

Итак, на итоговый результат биоанализа влияет множество факторов. Однако получение объективных результатов биотестов воз-

можно. Для этого необходимо обладать информацией о тестируемой среде, затем проводить научно обоснованный выбор тест-организмов с высокой чувствительностью к приоритетным токсикантам, использовать методы исследований, обеспечивающих наиболее строгую стандартизацию тест-культур и условий проведения биотестов. Для исключения ложных «нулевых» результатов биотестирования необходимо внедрять системные биотесты, оценивающие спектр тест-функций одного базового тест-организма. Итоговая интерпретация результатов биотестирования должна проводиться с учётом факторов, потенциально оказавших влияние на ответные реакции подопытных особей: свойства тестируемой среды, особенности тест-организмов, характеристики метода исследования и условий проведения экспериментов.

References

1. Ismail M.M., Hassan M., Essam T.M. Biological testing and toxicity bioassays in biodegradation: toward better process control // Toxicity and Biodegradation Testing. Book Series: Methods in Pharmacology and Toxicology / Eds. E.D. Bidoia, R.N. Montagnoli. Humana Press INC, Totowa, USA. 2018. P. 185–205. doi: 10.1007/978-1-4939-7425-2_9
2. Bosch-Orea C., Farre M., Barcelo D. Biosensors and bioassays for environmental monitoring // Past, present and future challenges of biosensors and bioanalytical tools in analytical chemistry: a tribute to professor marco mascini. Book Series: Wilson and Wilsons Comprehensive Analytical Chemistry / Eds. I. Palchetti, P.D. Hansen. Amsterdam: Elsevier Science BV, 2017. V. 77. P. 337–383. doi: 10.1016/bs.coac.2017.06.004
3. Altenburger R., Scholze M., Busch W., Escher B., Jakobs G., Krauss M., Krueger J., Neil P., Ait-Aissa S., Almeida A.C., Seiler T.B., Brion F., Hilscherova K., Hollert H., Novak J., Schlichting R., Serra H., Shao Y., Tyndall A., Tolefsen K.E., Umbuzeiro G., Williams T.D., Kortenkamp A. Mixture effects in samples of multiple contaminants – An inter-laboratory study with manifold bioassays // Environment International. 2018. V. 114. P. 95–106. doi: 10.1016/j.envint.2018.02.013
4. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy – EU Water Framework Directive (as amended on October 20, 2014). 2000. [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (Accessed: 14.09.2020).
5. Water code of the Russian Federation (as amended on December 27, 2018). 2006. [Internet resource] <http://docs.cntd.ru/document/901982862> (Accessed: 02.05.2019).

6. Olkova A.S. Modern trends in the development of the methodology of bioassay aquatic environments // Theoretical and Applied Ecology. 2018. V. 3. P. 19–26. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-019-026
7. Kutsenko S.A. Fundamentals of toxicology. Sankt-Peterburg: Foliant, 2004. 715 p. (in Russian).
8. Animal models in toxicology / Ed. S.C. Gad. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 1152 p.
9. Biochemical physics: frontal research/ Ed. S.D. Varfolomeev, B.B. Berezin. Waltham: Nova Biomedical, 2006. 133 p.
10. *In vitro* environmental toxicology – concepts, application and assessment // Advances in biochemical engineering-biotechnology / Eds. G. Reifferscheid, S. Buchinger. Cham: Springer, 2017. V. 157. 324 p.
11. Horne M.T., Dunson W.A. Effects of low pH, metals, and water hardness on larval amphibians // Archives of environmental contamination and toxicology. 1995. V. 29. No. 4. P. 500–505. doi: 10.1007/BF00208380
12. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V. Biomonitoring of metals in freshwater ecosystems. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 311 p. (in Russian).
13. Fokina A.I., Olkova A.S., Lyalina E.I., Darovskikh L.V. Investigation of the patterns of copper bioaccumulation by representatives of autotrophic and heterotrophic organisms // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2015. No. 6. P. 50–55 (in Russian).
14. Moiseenko T.I., Dauvalter V.A., Rodyushkin I.V. Mechanisms of circulation of natural and anthropogenic metals in the surface waters of the Subarctic // Water Resources. 1998. V. 25. No. 2. P. 231–243 (in Russian).
15. Zitoun R., Clearwater S.J., Hassler Ch., Thompson K.J., Albert A., Sanderabe S.G. Copper toxicity to blue mussel embryos (*Mytilus galloprovincialis*): The effect of natural dissolved organic matter on copper toxicity in estuarine waters // Science of the Total Environment. 2019. V. 653. P. 300–314. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.263
16. Varshal G.M., Koshcheeva I.Y., Khushvakhtova S.D., Velyukhanova T.K., Tatsii Y.G., Danilova V.N., Tyutyunik O.A., Chkhetiya D.N., Galuzinskaya A.K. Complex formation of mercury with humus acids: An important stage of the biospheric mercury cycle // Geokhimiya. 1999. V. 37. No. 3. P. 269–275 (in Russian).
17. Orlov D.S. Humic acids of soils and the general theory of humification. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1990. 324 p. (in Russian).
18. Miseiko G.N., Tushkova G.I., Tskhai I.V. *Daphnia magna* (Crustacea Cladocera) as a test object in optimal conditions of laboratory cultivation // News of the Altai State University. 2001. No. 3. P. 83–86 (in Russian).
19. Kartikyan S., Mani P. Investigation of the influence of heavy metals on muscle tissue proteins of Indian carp *Cirrhinus mrigala* depending on pH and water hardness // Biophysics. 2014. V. 59. No. 2. P. 392–398 (in Russian).
20. Federal Register 1.39.2007.03222. Biological control methods. Method for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, waste by mortality and changes in fertility of daphnia [Internet resource] <https://meganorm.ru/Index2/1/4293842/4293842234.htm> (Accessed: 27.03.2020) (in Russian).
21. ISO 10706-2000. Water quality – determination of long term toxicity of substances to *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). Applicable from 01.04.2000. International Organization for Standardization: Geneva, 2000. 17 p.
22. ISO 6341-1996. Water quality – determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) – acute toxicity test: withdrawn. International Organization for Standardization. Geneva, 1996. 7 p.
23. Test No. 202. *Daphnia* sp. acute immobilisation test. Adopted 23.11.2004. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Section 2. OECD. 12 p. doi: 10.1787/9789264069947-e
24. ISO 11267. Soil quality-inhibition of reproduction of *Folsomia candida* by soil pollutants. Inter. Stand. Org. Ed. Geneve. 1998. P. 1–16.
25. Hecker M., Giesy J.P. Effect-directed analysis of ah-receptor mediated toxicants, mutagens, and endocrine disruptors in sediments and biota // Effect-directed analysis of complex environmental contamination. Book series: Handbook of Environmental Chemistry Series. 2011. V. 15. P. 285–314. doi: 10.1007/978-3-642-18384-3_12
26. Dondero F., Banni M., Negri A. Boatti L., Dagnino A., Viarengo A. Interactions of a pesticide/heavy metal mixture in marine bivalves: a transcriptomic assessment // BMC GENOMICS. 2011. V. 12. Article No. 195. doi: 10.1186/1471-2164-12-195
27. Hetmanska B., Tomasik P., Tuszyński T. The metal-metal interactions in biological-systems. 2. *Saccharomyces cerevisiae* // Water Air and Soil Pollution. 1994. V. 74. No. 3–4. P. 281–288. doi: 10.1007/BF00479795
28. Lin Z., Ping Z., Kong D., Yin K., Cai Z. The ratios of individual chemicals in a mixture determine the degree of joint effect: The climax hypothesis // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2005. V. 49. No. 1. P. 1–8. doi: 10.1007/s00244-003-0206-2
29. Obiakor M.O., Ezeonyejiaku Ch.D. Copper-zinc coergisms and metal toxicity at predefined ratio concentrations: Predictions based on synergistic ratio model // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2015. V. 117. P. 149–154. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.03.035
30. Albert A. Selective toxicity. Physico-chemical bases of therapy. V. 2. Moskva: Medicine, 1989. 432 p. (in Russian).
31. Nikinmaa M. An introduction to aquatic toxicology. London: Academic press, 2014. 252 p.
32. Zovko M., Vidaković-Cifrek Ž., Cvetković Ž., Bošnić J., Šikić S. Assessment of acrylamide toxicity using a battery of standardised bioassays // Archives of Industrial Hygiene and Toxicology. 2015. V. 66. No. 4. P. 315–321. doi: 10.1515/aiht-2015-66-2715
33. Van der Grinten E., Pikkemaat M.G., Van den Brandhof E.J., Stroomberg G.J., Kraak M.H.S.

Comparing the sensitivity of algal, cyanobacterial and bacterial bioassays to different groups of antibiotics // *Chemosphere*. 2010. V. 80. No. 1. P. 1–6. doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.04.011

34. Mammalian toxicology / Ed. M.B. Abou-Donia. New York: Wiley, 2015. 720 p.

35. Bernard S., Neville K.A., Nguyen A.T., Flockhart D.A. Interethnic differences in genetic polymorphisms of CYP2D6 in the US population: Clinical implications // *Oncologist*. 2006. V. 11. No. 2. P. 126–135. doi: 10.1634/theoncologist.11-2-126

36. Church R.J., Gatti D.M., Urban T.J., Long N., Yang X., Shi Q., Eaddy J.S., Mosedale M., Ballard S., Churchill G.A., Navarro V., Watkins P.B., Threadgill D.W., Harrill A.H. Sensitivity to hepatotoxicity due to epigallocatechin gallate is affected by genetic background in diversity outbred mice // *Food and Chemical Toxicology*. 2015. V. 76. P. 19–26. doi: 10.1016/j.fct.2014.11.008

37. Dybing E., Soderlund E.J. Situations with enhanced chemical risks due to toxicokinetic and toxicodynamic factors // *Regulatory toxicology and pharmacology*. 1999. V. 30. No. 2. Pt. 2. P. 27–30. doi: 10.1006/rtp.1999.1322

38. Crouau Y., Cazes L. What causes variability in the *Folsomia candida* reproduction test? // *Applied Soil Ecology*. 2003. V. 22. No. 2. P. 175–180. doi: 10.1016/S0929-1393(02)00128-2

39. Terekhova V.A. Biotesting technologies in assessing the ecotoxicity of waste // *Ecology of production*. 2009. No. 1. P. 48–52 (in Russian).

40. Kokkali V., Van Delft W. Overview of commercially available bioassays for assessing chemical toxicity in aqueous samples // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2014. V. 61. P. 133–135. doi: 10.1016/j.trac.2014.08.001

41. Federal Law of the Russian Federation “On Technical Regulation” dated December 27, 2002 N 184-FZ; ed. from 28.11.2018 // *Rossiyskaya gazeta*. 2002. No. 245 (in Russian).

42. Terekhova V.A., Wadhia K., Fedoseeva E.V., Uchanov P.V. Bioassay standardization issues in freshwater ecosystem assessment: test cultures and test conditions // *Knowledge and management of aquatic ecosystems*. 2018. No. 419. Article No. 32. doi: 10.1051/kmae/2018015

43. Slabbert J.L., Venter E.A. Biological assays for aquatic toxicity testing // *Water Science and Technology*. 1999. V. 39. No. 10–11. P. 367–373. doi: 10.1016/S0273-1223(99)00300-5

44. Olkova A.S. Health monitoring of *Daphnia magna* Straus test culture // *Water and ecology: problems and solutions*. 2019. V. 24. No. 3 (79). P. 59–69. doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.59-69

45. Olkova A. Control of suitability of the culture *Daphnia magna* Straus for bioassays of aquatic environments, taking into account demographic indicators of model populations // *Water*. 2021. V. 13. No. 1. Article No. 47. doi: 10.3390/w13010047

46. Koval E.V. The influence of cyanobacteria on the vital activity of barley in conditions of contamination with methylphosphonic acid: dissertation ... of a candidate of biological sciences. Tyumen, 2019. 24 p. (in Russian).

47. Snell T.W., Moffat B.D., Janssen C., Persoone G. Acute toxicity tests using rotifers: IV. Effects of cyst age, temperature, and salinity on the sensitivity of *Brachionus calyciflorus* // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1991. V. 21. No. 3. P. 308–317. doi: 10.1016/0147-6513(91)90070-6

48. Khangaro B.S., Das S. Acute toxicity of metals and reference toxicants to a freshwater ostracod, *Cypris subglobosa* Sowerby, 1840 and correlation to EC (50) values of other test models // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 172. No. 2–3. P. 641–649. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.038

49. Michałowicz J., Duda W. Phenols – sources and toxicity // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2007. V. 16. No. 3. P. 347–362.

50. Park J.-S., Brown M.T., Han T. Phenol toxicity to the aquatic macrophyte *Lemna paucicostata* // *Aquatic Toxicology*. 2012. V. 106. P. 182–188. doi: 10.1016/j.aquat.2011.10.004

51. Ricco G., Tomei M.C., Ramadori R., Laera G. Toxicity assessment of common xenobiotic compounds on municipal activated sludge: comparison between respirometry and Microtox® // *Water Research*. 2004. V. 38. No. 8. P. 2103–2110. doi: 10.1016/j.watres.2004.01.020

52. Olkova A.S., Kantor G.Y., Kut'yavina T.I., Ashikhmina T.Y. The importance of maintenance conditions of *Daphnia magna* Straus as a test organism for ecotoxicological analysis // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2018. V. 37. No. 2. P. 376–384. doi: 10.1002/etc.3956

53. Elendt B.-P., Bias W.-R. Trace nutrient deficiency in *Daphnia magna* cultured in standard medium for toxicity testing. Effects of the optimization of culture conditions on life history parameters of *D. magna* // *Water Research*. 1990. V. 24. No. 9. P. 1157–1167. doi: 10.1016/0043-1354(90)90180-E

54. Persoone G., Baudo R., Cotman M., Blaise C., Thompson K.Cl., Moreira-Santos M., Vollat B., Törökne A., Han T. Review on the acute *Daphnia magna* toxicity test – Evaluation of the sensitivity and the precision of assays performed with organisms from laboratory cultures or hatched from dormant eggs // *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2009. No. 393. P. 1–29. doi: 10.1051/kmae/2009012

Метод оценки продуктивности морских акваторий по интегральной интенсивности биолюминесценции сообщества планктонных организмов

© 2021. Е. Б. Мельникова¹, к. б. н., с. н. с.,
А. Н. Серебренников¹, н. с.,
А. В. Мельников², к. т. н., доцент,

¹Институт природно-технических систем,
299011, Россия, г. Севастополь, ул. Ленина, д. 28,

²Севастопольский государственный университет,
299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33,
e-mail: helena_melnikova@mail.ru

Знания о продуктивности морских акваторий и общей биомассе планктонных организмов служат основой для разработки мероприятий по рациональному использованию природных ресурсов. В статье предложен метод оценки продуктивности морских акваторий, основанный на измерении интенсивности физических излучений, создаваемых в процессе жизнедеятельности живых организмов (явление биолюминесценции). Интенсивность биолюминесцентного излучения пропорциональна концентрации планктонных организмов и поэтому может быть использована для сравнительной оценки биологической продуктивности вод. Измерения интенсивности свечения гидробионтов производили в режиме *in situ* с помощью быстродействующего гидробиофизического прибора «Сальпа-М». Достоинствами предложенного метода оценки продуктивности вод являются: быстродействие и отсутствие необходимости проведения продолжительной во времени и дорогостоящей лабораторной обработки биологического материала. В результате проведённых исследований в прибрежных водах Крыма выделено 5 районов, различающихся по общей биомассе и численности организмов планктонных сообществ. Для выделенных районов проведён расчёт интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ). Сравнительная оценка продуктивности вод выделенных районов показала, что наибольшая ИИСГ (составляющая 37830 пВт/(см²·л)) наблюдалась на юго-западном шельфе Крыма. В Керченском предпроливном районе ИИСГ была в 1,24 раза меньше, а в западной глубоководной части Чёрного моря в 5–8 раз меньше, чем на высокопродуктивном юго-западном шельфе Крыма.

Ключевые слова: биолюминесценция, фитопланктонное сообщество, продуктивность акваторий, Чёрное море.

A method for assessing the productivity of marine areas by the integrated intensity of bioluminescence of the planktonic community

© 2021. E. B. Mel'nikova¹ ORCID: 0000-0001-7988-2541¹
A. N. Serebrennikov¹ ORCID: 0000-0002-8650-8168¹
A. V. Melnikov² ORCID: 0000-0002-3732-0791¹

¹Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina St., Sevastopol, Russia, 299011,

²Sevastopol State University,
33, Universitetskaya St., Sevastopol, Russia, 299053,
e-mail: helena_melnikova@mail.ru

A method for the comparative assessment of the productivity of marine water areas based on an analysis of the vertical distribution of the glow intensity (bioluminescence) of the community of planktonic organisms is presented. It is noted that planktonic communities that have a quick response to changes in the ecosystem can serve as an operational indicator of the effects of various environmental factors on it. Bioluminescence intensity measurements do not require laboratory processing of samples and are carried out in real time.

A methodology for calculating the integral intensity of bioluminescence of hydrobionts (ИИСГ), which characterizes the total biomass, the number of aquatic organisms, and the biological productivity of water, is described. As a result of

the studies carried out in the coastal waters of the Crimea, 5 regions were distinguished, differing in total biomass and number of organisms of planktonic communities. For selected areas, ПБН calculation was performed. A comparative assessment of the water productivity of the selected areas showed that the highest ПБН (an average of 37830 pW/(cm²·L)) was observed on the southwestern shelf of Crimea. In the area of the Kerch Strait, ПБН was 1.2 times less than on the highly productive south-western shelf of Crimea. In the north-western deepwater part of the sea, stable stratification of the waters promoted the formation of two layers with a high concentration of hydrobionts located at depths of 8–14 m and 40–45 m. At the same time, ПБН of the upper layer was the smallest in the study area and was 8 times lower than the value on the south-western shelf of Crimea. The results obtained on the productivity of water areas and the total biomass of plankton communities serve as the basis for the development of measures for the rational use of natural resources.

Keywords: bioluminescence, phytoplankton community, water productivity, Black Sea.

Происходящие климатические изменения и хозяйственная деятельность приводят к изменению экологического состояния морских акваторий, изменению структуры ихтиоценозов и необходимости оперативной сравнительной оценки продуктивности вод для рационального планирования объёмов вылова и районов промысла. Основную часть первичной продукции Мирового океана создает фитопланктон. Он составляет основу всех последующих этапов продукционного процесса и, вследствие этого, определяет функционирование всех звеньев пищевой цепи и биологическую продуктивность морских экосистем в целом [1]. Знания о продуктивности акваторий и общей биомассе планктонных сообществ, связанных с разнообразием гидрологической структуры вод, служат основой для разработки региональных мероприятий по рациональному использованию природных ресурсов.

Известно [2–6], что суммарное свечение фитопланктона (билюминесценция) отражает пространственную структуру и коррелирует с количеством и концентрацией организмов планктонного сообщества [6]. При этом функциональное состояние и, как следствие этого, интенсивность билюминесцентного излучения организмов планктонного сообщества, обладая быстрым реагированием на изменения в экосистеме, могут служить оперативным индикатором действия на неё различных факторов среды обитания [7–11] и, как следствие этого, показателем происходящих изменений биологической продуктивности вод и кормовой базы рыбных запасов. Измерения интенсивности билюминесценции проводят в режиме *in situ* с помощью быстродействующих гидробиофизических приборов, они не требуют лабораторной обработки проб и проводятся в реальном масштабе времени.

Целью работы является сравнительная оценка биологической продуктивности прибрежных вод Крыма на основе анализа интегральной интенсивности билюминесценции сообщества планктонных организмов.

Материалы и методы исследования

Исследования вертикального распределения интенсивности свечения планктонных сообществ проводили в летний период (июль–август) 2010, 2011 и 2013 гг. в 64, 65, 70, 73, 74, 77 рейсах научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий». Основной массив данных получен на 31 станции (рис. 1), которые расположены от мыса Тарханкут на западе до Керченского предпроливного района на востоке, в шельфовой и глубоководной зонах Крыма.

Вертикальное распределение интенсивности свечения планктонного сообщества исследовали методом многократного батифотометрического зондирования толщи воды с использованием гидробиофизического комплекса «Сальпа-М», разработанного Гидрооптик-Ltd, НПП «Аквастандарт-Юг» (г. Севастополь, Россия) [12]. С его помощью измеряли также температуру и электропроводность воды, которую пересчитывали в солёность. Дискретность измерений в режиме зондирования со скоростью 1,2 м/с составляла 1 м. Съёмки проводили в ночное время.

Для сравнительной оценки продуктивности акваторий вначале проводили группировку станций по схожести вертикального распределения интенсивности билюминесценции с использованием кластерного анализа [13]. Для этого был образован 31 монокластер, каждый из которых характеризовал вертикальное распределение интенсивности свечения гидробионтов на исследуемых станциях и проводилась группировка кластеров агломеративно-иерархическим методом.

Для оценки биологической продуктивности морских акваторий введено понятие интегральной интенсивности свечения гидробионтов (ИИСГ), которую находили по следующей методике. При обработке результатов вертикального зондирования сначала находили значение максимальной интенсивности билюминесценции для данного зондирования. Затем выделяли диапазон глубин, в пределах

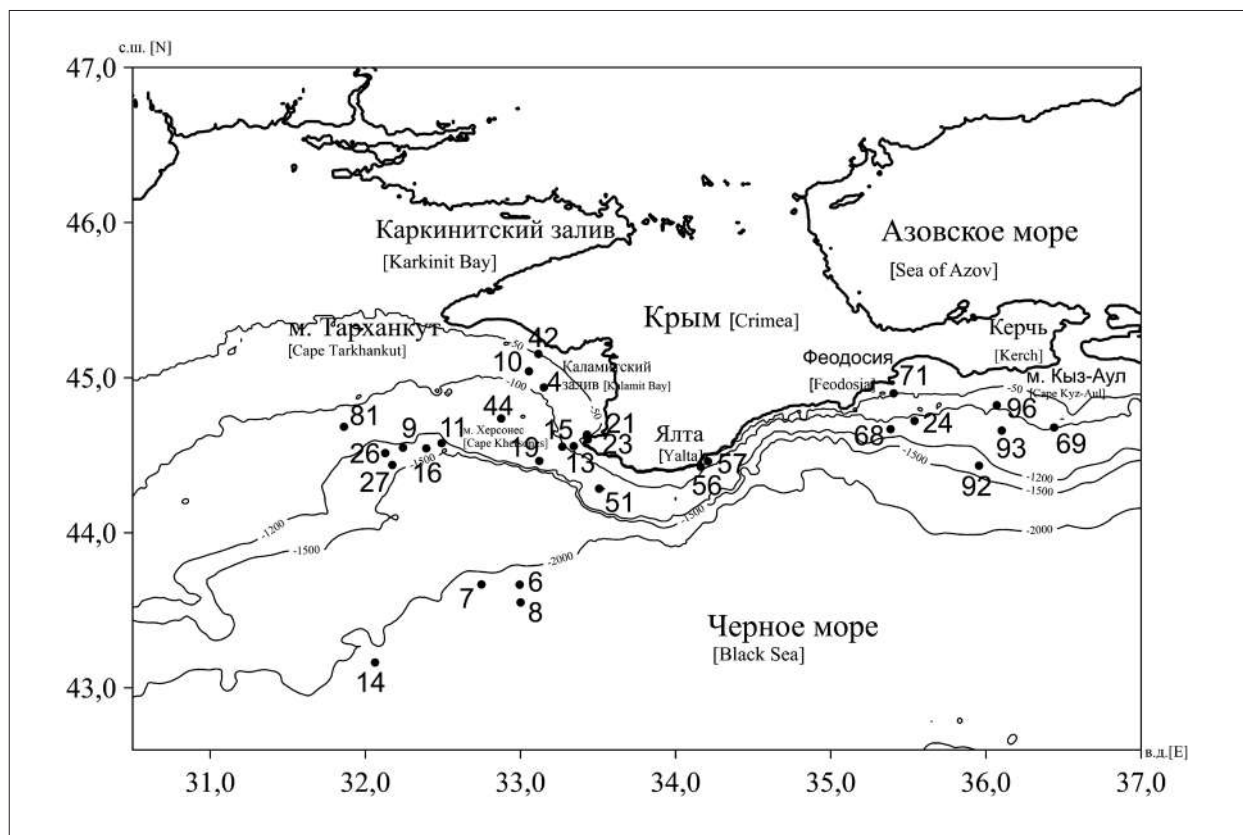


Рис. 1. Схема расположений станций / Fig. 1. The scheme of location of stations

которого интенсивность биолюминесценции изменялась от максимального значения до уровня 0,5 от максимального значения. Этот диапазон глубин называли слоем с высоким уровнем интенсивности биолюминесценции. Далее для выделенного диапазона глубин суммировали все измеренные значения интенсивности свечения организмов (шаг дискретности измерения 1 м) и полученное значение назвали интегральной интенсивностью свечения гидробионтов. Полученное значение ИИСГ пропорционально как интенсивности свечения гидробионтов, так и ширине слоя с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов. С учётом высокой корреляции интенсивности свечения и концентрации гидробионтов [2, 4, 6, 14], полученное значение ИИСГ позволяет оценить общую биомассу и численность гидробионтов, характеризующих биологическую продуктивность вод.

Математическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel 7.0, Statistica 6.0, SigmaPlot 12.5, Surfer 13.0.

Результаты и обсуждение

Результаты группировки станций показаны на рисунке 2. Анализ результатов

агломерации (рис. 2) позволяет выделить 5 независимых групп (районов), характеризующихся близкими значениями вертикального распределения интенсивности биолюминесценции, и, как следствие этого, близкими значениями биологической продуктивности вод выделенных районов.

Группу 1 образуют станции 4, 10, 13, 17, 18, 21, 23, 42, 56 и 57, расположенные в районе мелководного юго-западного шельфа Крыма; группу 2 образуют станции 24, 68, 69, 71, 92, 93, 96, расположенные в акватории Керченского предпроливного района и района Феодосийского залива; группу 3 образуют станции 15, 19, 44 и 51, расположенные в районе свала глубин; группу 4 образуют глубоководные станции 6, 7, 8 и 14, расположенные в западной части моря; группу 5 образуют станции 9, 11, 16, 26, 27 и 81, расположенные в районе мыс Херсонес – мыс Фиолент.

Дальнейший сравнительный анализ особенностей выделенных районов мы производили по усреднённым для сравниваемых районов характеристикам вертикального распределения интенсивности свечения гидробионтов и ИИСГ. При этом учитывали, что черноморские воды вдоль крымского побережья в целом характеризуются высокой

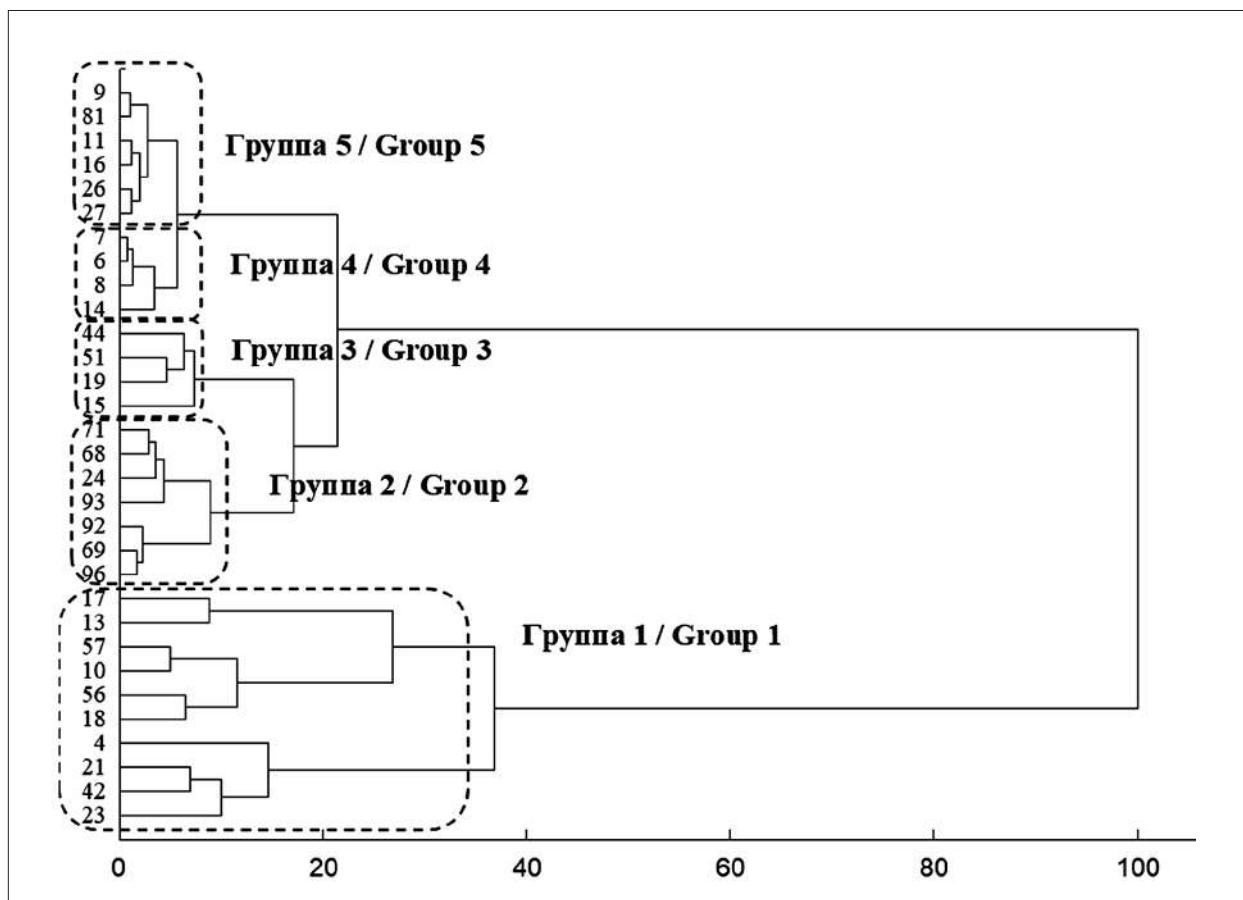


Рис. 2. Группировка станций в прибрежных водах Крыма
 Fig. 2. Grouping of stations in the coastal waters of Crimea

динамической активностью, связанной с близостью Основного Черноморского течения (ОЧТ) [15–17], оказывающего существенное влияние на экологическое состояние прибрежных вод и вертикальное распределение интенсивности свечения фитопланктонного сообщества [9].

На рисунке 3 изображено типичное вертикальное распределение интенсивности свечения гидробионтов в рассматриваемых регионах.

Первую группу (рис. 3а) образуют станции 4, 10, 13, 17, 18, 21, 23, 42, 56 и 57, расположенные на мелководном юго-западном шельфе Крыма с глубинами, не превышающими 100 м. Близость дна и вертикальные перемешивания водных масс приводят к подъёму придонных вод, обогащённых биогенными веществами. Поэтому этот район характеризуется высокой биологической продуктивностью вод.

В летний период происходит массовое развитие мелкоклеточных теплолюбивых представителей светящихся динофлагеллят; это виды рода *Goniaulax* – *G. apiculate*, *G. digitale*, рода *Scrippsiella* – *S. trochoidea*, рода

Protoperidinium – *P. claudicans*, *P. conicum*, *P. globules*, *P. pellucidum*, *P. solidicorne*, *Lincolodinium polyedrum* [12]. Эти виды в летний период характеризуются увеличением численности и биомассы в верхнем слое. Однако следует отметить, что в районе проведения исследований при высоких температурах (более 23 °С) интенсивность свечения теплолюбивых видов в приповерхностном слое уменьшалась и увеличивалась в термоклине и/или под ним. Так слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов, характеризующим плотность популяции, располагался в нижней части сезонного термоклина и даже частично в холодном промежуточном слое (ХПС) на глубинах от 15 до 23 м (рис. 3а).

Расчёты показали, что на мелководном юго-западном шельфе Крыма интегральная интенсивность свечения гидробионтов была самой высокой для всего района проведения исследований и в среднем составляла 37830 пВт/(см²·л), что подтвердило измеренную предложенным методом биOLUMИнесцентных измерений высокую продуктивность вод этого района.

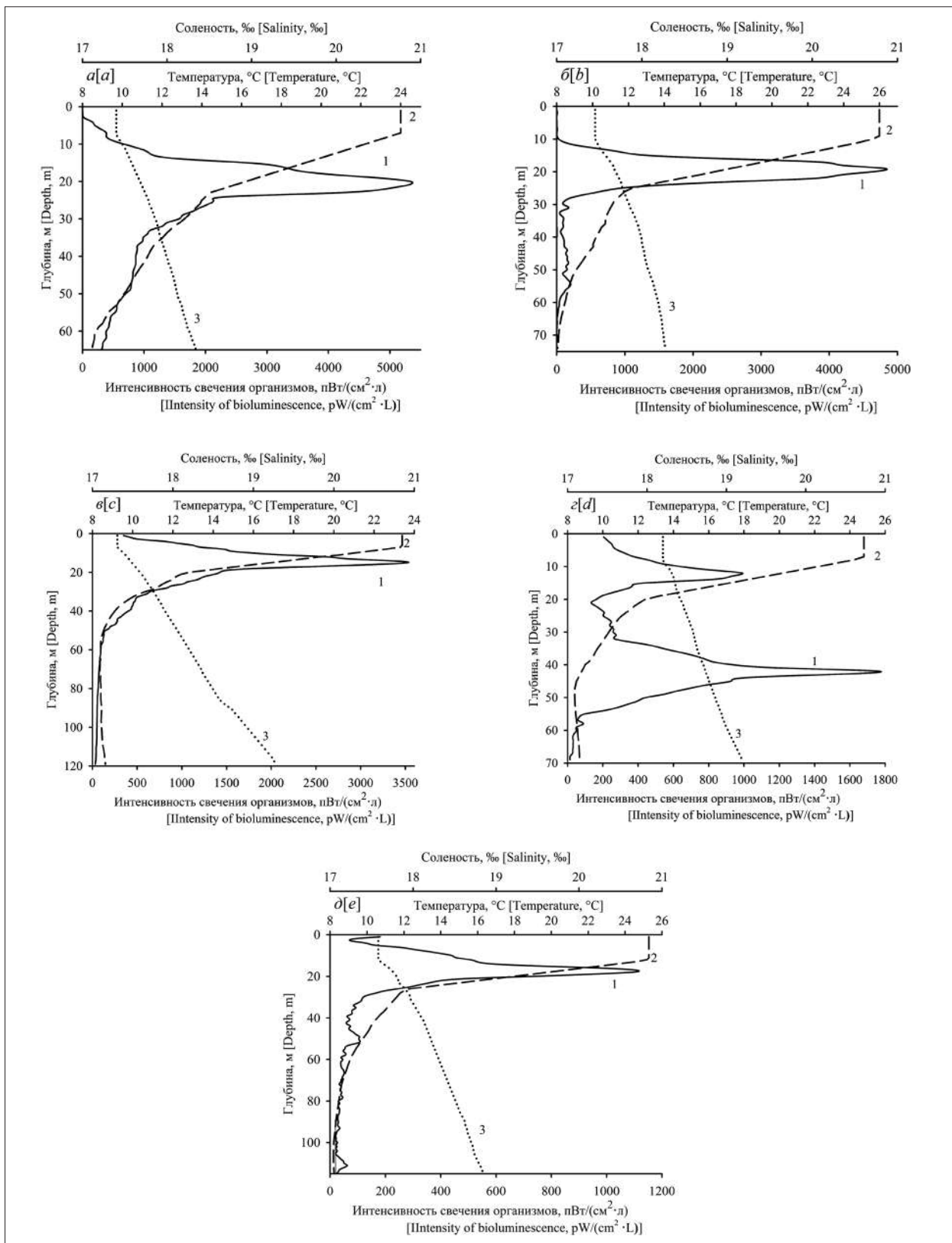


Рис. 3. Средние вертикальные распределения интенсивности свечения гидробионтов (1), температуры (2), солёности (3) в летний период: а) мелководный юго-западный шельф Крыма; б) район Феодосия-Керчь; в) свал глубин;

г) глубоководные станции; д) район мыс Херсонес – мыс Фиолент
 Fig. 3. Average vertical distributions of the bioluminescence intensity of hydrobionts (1), temperature (2), salinity (3) in the summer period: а) shallow South-Western shelf of the Crimea; б) Feodosia-Kerch area; в) the region of falling depth; д) deep-water stations; е) Cape Khersones – Cape Fiolent area

Вторую группу образуют станции 24, 68, 69, 71, 92, 93 и 96 с глубинами от 100 до 1300 м, расположенные в акватории Керченского предпроливного района и Феодосийского залива. В этом районе значительное влияние на гидрологические параметры среды и стратификацию вод оказывают прогретые воды Азовского моря, способствующие повышению температуры, а также вдольбереговые течения, связанные с ОЧТ. В районе Керченского предпроливного района верхний перемешанный слой (ВПС) был прогрет в среднем до температуры 26 °С, что было самым высоким, а слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов находился глубже, чем на других станциях района проведения исследований (рис. 3б). ИИСГ в среднем составляла 30530 пВт/(см² · л), что свидетельствует о достаточно высокой биологической продуктивности вод, при этом биомасса фитопланктонного сообщества уступала лишь (примерно на 20–25%) биомассе фитопланктона, обитающего на высокопродуктивном юго-западном шельфе.

Третью группу образуют станции 15, 19, 44 51 с глубинами от 100 до 500 м, расположенные в районе свала глубин в юго-западной и южной части прибрежных вод Крыма. В этом районе ВПС был прогрет в среднем до температуры 23,4 °С, слой с высокой интенсивностью свечения гидробионтов находился в сезонном термоклине (рис. 3в) на глубинах от 10 до 18 м. ИИСГ в среднем составляла 23680 пВт/(см² · л), что было в 1,6 раза меньше, чем на юго-западном шельфе Крыма.

Четвёртую группу образуют станции 6, 7, 8 и 14, расположенные в глубоководной ($h \geq 2000$ м) северо-западной части моря. Отдалённость от берега и большие глубины – основные факторы, влияющие на гидрологические особенности и вертикальную термическую структуру вод. В районе расположения этих станций термохалинная структура вод была хорошо сформирована. Верхний перемешанный слой был прогрет до 24,8 °С, а его толщина составляла 7 м. Глубже залегал сезонный термоклин, ширина которого достигала 11 м с типичным вертикальным градиентом температуры 1,0 °С/м, что было самым высоким в районе проведения исследований (рис. 3г). Устойчивость водной массы в глубоководных районах приводит к разделению теплолюбивых и глубоководных холодолюбивых фитопланктонных комплексов. В верхнем слое, как и в других районах, происходит массовое развитие теплолюбивых

мелкоклеточных светящихся динофлагеллят, приводящее к увеличению численности и биомассы. Это представители рода *Goniaulax* и рода *Protoperdinium*. В глубоководном слое преобладали крупноклеточные холодолюбивые виды, которые вносили основной вклад в суммарную интенсивность свечения организмов. Это представители рода *Neoceratium* – *N. furca*, *N. fusus*, *N. tripos* и рода *Protoperdinium* – *P. divergens*, *P. pallidum*, *P. steinii*, *P. crassipes* [12].

Глубоководные виды фитопланктона создают повышенные концентрации в ХПС, а теплолюбивые виды – в верхнем слое. В соответствии с этим наблюдалось два слоя с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов (рис. 3г). Первый слой размещался в верхней части сезонного термоклина на глубине от 9 до 14 м, при средней температуре в этом слое – 20,7 °С, солёности – 18,29‰. В верхнем слое ИИСГ составляла в среднем 4700 пВт/(см² · л), что является самым низким значением для района проведения исследований и было в 8 раз меньше, чем на юго-западном шельфе. Второй слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов размещался в ХПС на глубинах от 40 до 45 м при средней температуре 8,8 °С и солёности – 18,96‰. Средняя ИИСГ в нижнем слое составляла 7325 пВт/(см² · л), что более чем в 1,5 раза превышало значение, наблюдавшееся в верхнем слое.

Пятую группу образуют станции 9, 11, 16, 26, 27, расположенные в районе мыс Херсонес – мыс Фиолент с глубинами от 1200 до 1400 м и ст. 81 с глубиной 770 м. В период проведения исследований эти станции находились в зоне конвергенции, характеризующейся накоплением поверхностных малопродуктивных вод и их опусканием. Слой с высоким уровнем интенсивности свечения гидробионтов, характеризующий распределение по глубине биомассы планктона, располагался в термоклине на глубинах от 14 до 20 м (рис. 3д). С учётом опускания малопродуктивных поверхностных вод среднее значение ИИСГ в этом районе было незначительным и составляло 6100 пВт/(см² · л), что было в 6,2 раза меньше, чем на юго-западном шельфе Крыма.

Выводы

1. Предложен метод сравнительной оценки биологической продуктивности морских акваторий, основанный на расчёте интегральной интенсивности свечения гидробионтов.

2. Сравнительная оценка биологической продуктивности выделенных 5 районов прибрежных вод Крыма, проведенная предложенным методом, показала, что наибольшая ИИСГ (37830 пВт/(см² · л)) в летний период наблюдалась на юго-западном шельфе Крыма, что характеризует этот район как высокопродуктивный.

3. В районе Керченского предпроливного района и районе Феодосийского залива ИИСГ уступала на 20–25% значению на высокопродуктивном мелководном юго-западном шельфе.

4. В северо-западной части моря устойчивая стратификация вод способствовала формированию двух слоёв с высокой концентрацией гидробионтов, расположенных на глубинах 8–14 м и 40–45 м. При этом ИИСГ верхнего слоя была наименьшей в районе проведения исследования и уступала значению на юго-западном шельфе Крыма в 8 раз.

Полученные результаты могут быть использованы в рыбопромысловой отрасли при планировании объёмов вылова и районов промысла.

References

- Zavoruev V.V., Zavorueva E.N., Krum S.P. Plankton distribution in areas of frontal zones of aquatic ecosystems. Krasnoyarsk: Sibirskiy federalnyy universitet, 2012. 292 p. (in Russian).
- Gitelson I.I., Levin L.A. Bioluminescence in oceanology // *J. Biolumin. Chemilumin.* 1989. V. 4. No. 1. P. 555–562. doi: 10.1002/bio.1170040173
- Haddock S.H.D., Moline M.A., Case J.F. Bioluminescence in the Sea // *Annual Review of Marine Science.* 2010. V. 2. P. 443–493. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081028
- Tokarev Yu.N., Bitjukov E.P., Vasilenko V.I., Sokolov B.G. Bioluminescence field – a characteristic indicator of the structure of the plankton community of the Black Sea // *Ekologiya morya.* 2000. No. 53. P. 20–25 (in Russian).
- Herren C.M., Alldredge A.L., Case J.F. Coastal bioluminescent marine snow: fine structure of bioluminescence distribution // *Continental Shelf Research.* 2003. V. 24. P. 413–442. doi: 10.1016/j.csr.2003.10.008
- Cherepanov O.A., Levin L.A., Utyushev R.N. The relationship of bioluminescence with biomass and number of the luminous and total plankton. 2. The Black Sea // *Marine Ecological Journal.* 2007. V. 6. No. 3. P. 84–89 (in Russian).
- Tokarev Yu.N., Melnikova E.B. The influence of hydrophysical parameters on intensity of bioluminescence field in the Black Sea // *Hydrobiol. J.* 2012. V. 48. No. 4. P. 93–99. doi: 10.1615/HydrobJ.v48.i4.70
- Melnikova E.B. The spatial variability of the intensity of the bioluminescence field in coastal waters of the Crimean Peninsula in the spring period // *Inland Water Biology.* 2016. V. 9. No. 2. P. 135–141. doi: 10.1134/S1995082916010120
- Polonsky A.B., Mel'nikova E.B., Serebrennikov A.N., Tokarev Yu.N. Regional peculiarities of hydrobiont bioluminescence intensity and chlorophyll a concentration in Black Sea waters // *Atmospheric and Oceanic.* 2018. V. 31. No. 4. P. 365–371. doi: 10.1134/S1024856018040085
- Shemshedinova E.Sh., Abduramanova E.R., Morozkina E.V., Katsev A.M. Luminescent whole-cell biosensors in detection of environmental contaminants (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 2. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-006-013
- Zhavoronkov V.I., Zakharov V.Yu., Reznik E.N., Sabashny D.V. Electronic optics methods for studying the effects of anthropogenic factors on biological objects // *Theoretical and Applied Ecology.* 2011. No. 1. P. 29–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-029-030
- Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Mashukova O.V. Planktonic bioluminescent of the World Ocean: species diversity, characteristics of light emission in normal conditions and under anthropogenic impact. Simferopol: N. Orianda, 2016. 340 p.
- Mandel' I.D. Cluster analysis. Moskva: Finansy i statistika, 1988. 176 p. (in Russian).
- Moline M.A., Blackwell S.M., Case J.F., Haddock S.H.D., Herren C.M., Orrico C.M., Terrill E. Bioluminescence to reveal structure and interaction of coastal planktonic communities // *Deep Sea Res II.* 2009. V. 56. P. 232–245. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.08.002
- Dzhiganshin G.F., Polonsky A.B. Kinematic structure and mesoscale variability of the rim current near the coast of Crimea (according to the data of instrumental measurements in September 2008) // *Physical Oceanography.* 2011. V. 21. No. 1. P. 23–32. doi: 10.1007/s11110-011-9101-y
- Polonsky A.B., Lovenkova E.A. Long-term tendencies in the variability of characteristics of the Black Sea pycnocline // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2006. V. 42. No. 3. P. 386–396. doi: 10.1134/S000143380603012
- Tuzhilkin V.S. Thermochaline structure of the sea. The Black Sea environment // *The handbook of environmental chemistry.* Berling, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 5. Part Q. P. 217–253. doi: 10.1007/698_5_077

Оценка стабильности морфофункциональных свойств ризосферных штаммов *Bacillus subtilis* с помощью атомно-силовой микроскопии

© 2021. М. Н. Артамонова, к. б. н., доцент,
Н. И. Потатуркина-Нестерова, д. м. н., профессор, Б. Б. Костишко, м. н. с.,
Ульяновский государственный университет,
432970, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42,
e-mail: artamonovamn2013@yandex.ru

Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) обладает важным преимуществом – нетребовательностью к электропроводности исследуемых объектов, что позволяет изучать живые клетки без фиксации и с высоким разрешением. Предложено использовать высокоразрешающую АСМ для определения морфометрических и упруго-механических свойств маркерного вида *Bacillus subtilis*, выделенного из ризосферы сельскохозяйственной культуры *Cucurbita pepo* L. в динамике её роста. Указанные свойства микроорганизма-симбионта являются показателями функциональной активности и устойчивости к действию биотических и абиотических факторов окружающей среды. Показана стабильность линейных параметров (длина, ширина и высота) бацилл, выделенных в различные фазы развития растения, модуль упругости и показателя среднеквадратичной шероховатости поверхности ризосферных штаммов бацилл. Так, в фазе «всходы», «бутонизация», «цветение» и «плодоношение» растения модуль упругости бацилл составил 5,9; 5,8; 6,0 и 5,7 МПа соответственно; показатель среднеквадратичной шероховатости поверхности – 37,5; 35,1; 31,8 и 40,0 нм соответственно ($p > 0,05$). АСМ-идентификация поверхности клеток *B. subtilis* выявило изменение адгезивной активности изучаемых штаммов. В фазы «всходы» и «бутонизация» данный показатель составил 32,0 и 41,0 нН соответственно, в фазе «цветение» и «плодоношение» значения силы адгезии достоверно увеличивались по сравнению с первыми фазами (73,0 и 69,0 нН соответственно; $p < 0,05$).

Использование технологии атомно-силовой микроскопии показало её эффективность при исследовании стабильности морфометрических и упруго-механических свойств *B. subtilis*, являющихся отражением их функциональной активности растения-симбионта.

Ключевые слова: бактериально-растительный симбиоз, сканирующая зондовая микроскопия, сила адгезии бактериальных клеток, упруго-механические свойства бактерий, ризосферные бактерии.

The stability assessment of the morphological and functional characteristics of rhizospheric strains of *Bacillus subtilis* using atomic force microscopy

© 2021. M. N. Artamonova ORCID: 0000-0002-1352-5274,
N. I. Potaturkina-Nesterova ORCID: 0000-0002-0922-8314,
B. B. Kostishko ORCID: 0000-0002-1112-0740,
Ulyanovsk State University,
42, L'va Tolstogo St., Ulyanovsk, Russia, 432970,
e-mail: artamonovamn2013@yandex.ru

The important advantage of atomic force microscopy (AFM) is the low power requirements for the studied objects, which allows studying living cells without fixation and with high resolution. It was proposed to use AFM to determine the morphometric and elastic-mechanical characteristics of the marker specie *Bacillus subtilis* isolated from the rhizosphere of the *Cucurbita pepo* L. crop in different vegetative phase of plant development. These characteristics of the microorganism are indicators of their functional activity and resistance to the action of biotic and abiotic environmental factors. It was shown that some parameters (length, width and height, elastic modulus, and the root mean square roughness) of *B. subtilis* isolated at different phases of plant growth were stable. So, elastic modulus of the bacilli was equal to 5.9 in plant sprouting phase, 5.8 in the phase of budding, 6.0 in the phase of flowering, 5.7 MPa in the phase of fruiting of the plant. The indicator of the root mean square surface roughness was equal to 37.5 in plant sprouting phase; 35.1 in the phase of budding; 31.8 in the phase of flowering and 40.0 nm in the phase of fruiting of the plant. AFM study of the surface of *B. subtilis* cells revealed a change of the adhesion force of the studied strains. This indicator was equal to 32.0 and 41.0 nN

in plant sprouting and budding phases respectively. And the adhesion force was increasing significantly in the flowering and fruiting phase in comparison to the first phases (73.0 and 69.0 nN, respectively; $p < 0.05$).

The use of atomic force microscopy technology has shown its effectiveness in studying of the stability of the morphometric and elastic-mechanical characteristics of *B. subtilis*, which are indicators of functional activity of the plant.

Keywords: bacterial-plant symbiosis, scanning probe microscopy, adhesion force of bacterial cells, elastic-mechanical characteristics, rhizospheric bacteria.

Создание туннельного микроскопа позволило осуществить принципиально новый метод микроскопических исследований – сканирующую зондовую микроскопию, основанную на силовом взаимодействии между наноразмерным кантилевером, располагающимся на конце упругой консоли микроскопа, и поверхностью исследуемого образца, действие которого обусловлено силами его упругости, адгезии, магнитными и электростатическими силами, что приводит к изгибу консоли. Регистрируя уровень изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью объекта исследования [1]. Важным преимуществом данного метода явилась нетребовательность к электропроводности исследуемых объектов, что позволяет изучать живые клетки без фиксации и с высоким разрешением [2].

Преимуществом данного метода, в отличие от световой микроскопии, является возможность не просто визуализировать объект и получить трёхмерное изображение, но и проводить анализ таких важнейших общих интегральных показателей, как уровень упруго-механических (вязко-эластических) свойств, мобильность поверхностных слоёв, шероховатость (складчатость) и др., свидетельствующие о функциональной активности бактерий [3]. Перечисленные показатели отражают фундаментальные механические свойства микроорганизмов, их функциональность и устойчивость к действию биотических и абиотических факторов окружающей среды [4].

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет количественно оценить адгезивную активность микроорганизмов, которая, как известно, является начальным этапом формирования микробных сообществ. Прикрепление к поверхности корней и дальнейший рост в адгезированном состоянии являются факторами, оказывающими сильнейшее влияние на процессы жизнедеятельности микробов, оно делает возможным потребление нерастворимых субстратов, изменяет скорость метаболизма микроорганизмов, позволяет им создавать сложные микробные сообщества и, синтезируя определённые метаболиты, оказы-

вать существенное благоприятное воздействие на растение-симбионт. Известно, что жизнедеятельность и продуктивность растений во многом зависят от того, какие микробы и в каком количестве колонизируют поверхность и внутренние компартменты растения [5].

Метод АСМ позволяет получить представление о таких свойствах исследуемого объекта, как шероховатость поверхности клетки, показывающую отклонение рельефа от среднего значения; показателя упругости, характеризующего степень ригидности клеточной стенки и адгезивной активности клетки, определяющей силу её взаимодействия с биотическими или абиотическими поверхностями [6]. Однако, возможности АСМ-исследований микроорганизмов до сих пор использовались только для визуализации 3D изображений бактерий или для изучения упруго-механических и адгезивных свойств при взаимодействии бактериальных клеток с абиотическими поверхностями, например, с углеродными наноматериалами, представленными одно- и многостенными нанотрубками, нановолокнами и C60-фуллеренами [7]. До сих пор остаётся не изученным взаимодействие микроорганизмов с биологическими объектами, являющимися компонентами природных симбиотических систем.

Примером такого взаимодействия является симбиоз растений и их микробиоты. Онтогенез растений происходит при их тесном взаимодействии с микроорганизмами почвы, которые заселяют ризосферу и образуют ассоциацию: «микроорганизмы – корневая система растения». В этой связи большой интерес представляют ризосферные микроорганизмы, формирующие на корнях растений сложные по таксономическому составу и структурно-функциональной организации сообщества, оказывающие на растения полифункциональное воздействие [8].

Рядом работ, посвящённых изучению симбиотной микробиоты ризосферы технических, древесных и овощных культур, показано их влияние на продуктивность и урожайность растений [9–11]. Растение, стимулируя размножение микроорганизмов около своих корней, обеспечивает себе мощный дополни-

тельный фактор воздействия на почву, в результате чего образуются доступные питательные вещества, накапливаются различные физиологически активные и стимулирующие вещества, что улучшает условия питания растений и, следовательно, формируются условия для взаимовыгодного симбиоза [12].

Одним из наиболее активных продуцентов метаболитов, оказывающих положительное влияние на растения, являются бактерии вида *Bacillus subtilis* [13]. Показано, что ризосфера сельскохозяйственной культуры *C. pepo* L. представляет собой плотно заселённую нишу с высоким уровнем видового разнообразия и колонизационной плотности микроорганизмов, доминирующее положение среди которых занимает вид *B. subtilis* [14]. От морфофункциональных и механических свойств данных бактерий зависит их влияние на физиологическое состояние растения-симбионта, возможно, это воздействие изменяется в процессе роста растения. В связи с этим определение степени выраженности указанных свойств бактериального компонента может быть перспективным для разработки методов естественного воздействия на сельскохозяйственные растения. Однако анализ литературных данных показал, что исследование морфофункциональной активности ризобактерий, выделенных в различные стадии вегетации растения, не проводилось.

Целью исследования явилось проведение методом атомно-силовой микроскопии сравнительного анализа морфометрических и упруго-механических параметров штаммов *B. subtilis*, выделенных из микробного сообщества ризосферы *C. pepo* L. в динамике вегетационного развития растения-симбионта.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования явились штаммы *B. subtilis*, выделенные из ризосферы сельскохозяйственной культуры *C. pepo* L. сорта «Лечебная». Растения возделывали в условиях закрытого грунта в соответствии с нормами технологического проектирования тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады (НТП 10-95) в теплицах ООО «Поволжская Агро Компания» на территории Ульяновской области. Выделение бактерий из 240 проб ризопланы тыквы обыкновенной осуществляли по методу последовательных отмываний корней [15].

Морфологические и упруго-механические свойства ризосферных штаммов бактерий определяли в фазах «всходы», «бутонизация»,

«цветение» и «плодоношение». Морфометрические и упруго-механические параметры бактериальных клеток (длину, ширину, высоту, модуль упругости, среднееквадратичную шероховатость микро- и нанорельефа и силу адгезии) исследовали с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-PRO (NT-MDT, Россия). Микроскопию осуществляли в полуконтактном режиме, который позволяет визуализировать шероховатость и малоразмерные детали рельефа поверхности. При работе в полуконтактном режиме кантилевер колеблется на своей резонансной частоте. В нижнем полупериоде колебаний кантилевер касается поверхности образца. При этом происходит измерение амплитуды колебаний, которая в последующем используется в качестве начальной точки регистрации обратной связи при отталкивании кантилевера от поверхности образца. При поддержании постоянной амплитуды колебаний выстраивается топографическое изображение исследуемого объекта. В полуконтактном режиме АСМ происходит кратковременное взаимодействие острия кантилевера с поверхностью бактериальных клеток, поэтому повреждения исследуемого объекта в значительной мере исключаются [16].

Шероховатость или образование складок поверхностной мембраны увеличивает поверхность бактериальной клетки, что имеет существенное значение для её метаболизма. Для измерения шероховатости использовали модуль Юнга, выражающий зависимость между действующей на бактериальную клетку силой (F) и глубиной продавливания. Силу адгезии определяли по отклонению консоли от поверхности исследуемой клетки [17].

Статистическую обработку данных производили с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 6.0. Оценку статистической значимости полученных результатов осуществляли с помощью t -критерия Фишера-Стьюдента ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Анализ АСМ-изображений *B. subtilis* показал, что бактерии, выделенные из микробного сообщества ризосферы *C. pepo* L., во все изученные фазы роста бактерий, располагались преимущественно одиночно, имели типичную форму (рис. 1а, б). Линейные параметры бактерий в исследуемых образцах были однородными, средние значения размеров бактерий *B. subtilis* составили $3,5 \pm 0,2$ в длину, $2,4 \pm 0,1$ в ширину и $1,9 \pm 0,1$ мкм в высоту.

Результаты, полученные путём АСМ - идентификации поверхности живых микробных клеток *B. subtilis*, регистрации и анализа силовых кривых, показали стабильность упруго-механических свойств бактерий, выделенных из микробиоценоза ризосферы в различные периоды вегетации растения.

При АСМ-визуализации бацилл было установлено, что ультраструктура поверхности была относительно гладкой с малоразвитым рельефом, что является характерным признаком грамположительных бактерий и определяется особенностью строения клеточной стенки подобного типа (рис. 1).

Параметры среднеквадратичной шероховатости клеток *B. subtilis*, выделенных в различные периоды вегетации растения, не имели достоверных различий. В фазы «всходы»,

«бутонизация», «цветение» и «плодоношение» они составили $37,5 \pm 0,6$; $35,1 \pm 4,6$; $31,8 \pm 2,8$ и $40,0 \pm 2,1$ нм соответственно ($p < 0,05$). Следовательно, данный показатель оставался стабильным на протяжении всех изученных фаз роста растения-симбионта.

Анализ упруго-механических свойств исследуемых штаммов показал, что уровень модуля упругости *B. subtilis*, выделенных из микробиоценоза ризосферы *C. pepo* L., также достоверно не изменялись в процессе вегетационного развития растения. Модуль упругости *B. subtilis* в фазе «всходы» составил $5,9 \pm 0,2$, в фазе «бутонизация» – $5,8 \pm 0,1$, в фазе «цветение» – $6,0 \pm 0,3$ и фазе «плодоношение» – $5,7 \pm 0,3$ МПа ($p < 0,05$). Уровень значений среднеквадратичной шероховатости клеточной поверхности также свидетельствовал

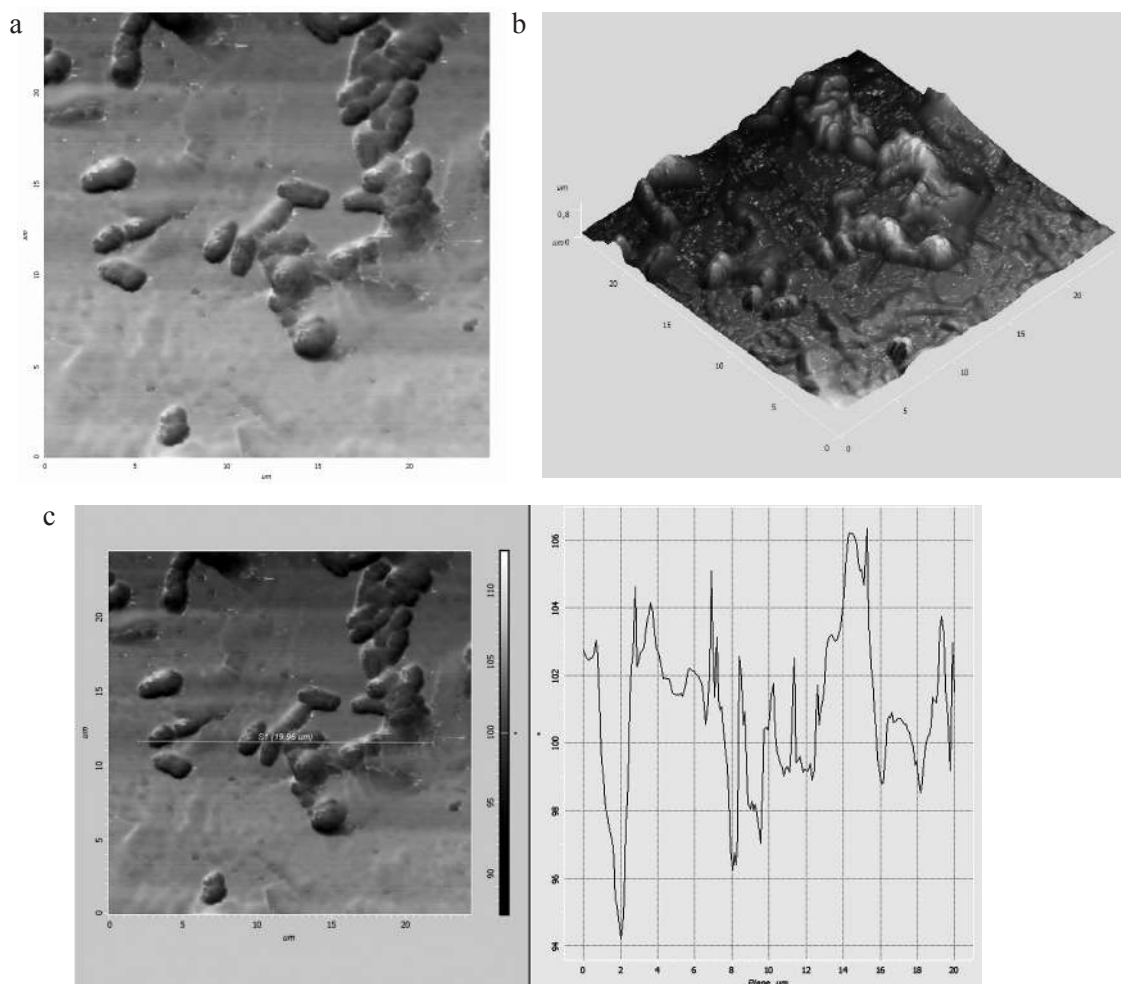


Рис. 1. АСМ-изображение *B. subtilis*: а) полученное в полуконтактном режиме; б) 3D – изображение; в) профиль сечения на выбранном участке АСМ-скана, отображающий особенности топографии поверхности бактериальных клеток. Микробные клетки 10-часовой культуры *B. subtilis* адсорбированы на слюде. Размер скана: 25×25 мкм

Fig. 1. AFM-image of *B. subtilis*: а) obtained in semi-contact mode; б) 3D-image; в) cross-sectional profile on the selected area of the AFM scan displaying the features of the surface topography of bacterial cells. Microbial cells of a 10-hour culture of *B. subtilis* are adsorbed on mica. Scan size is 25×25 μm

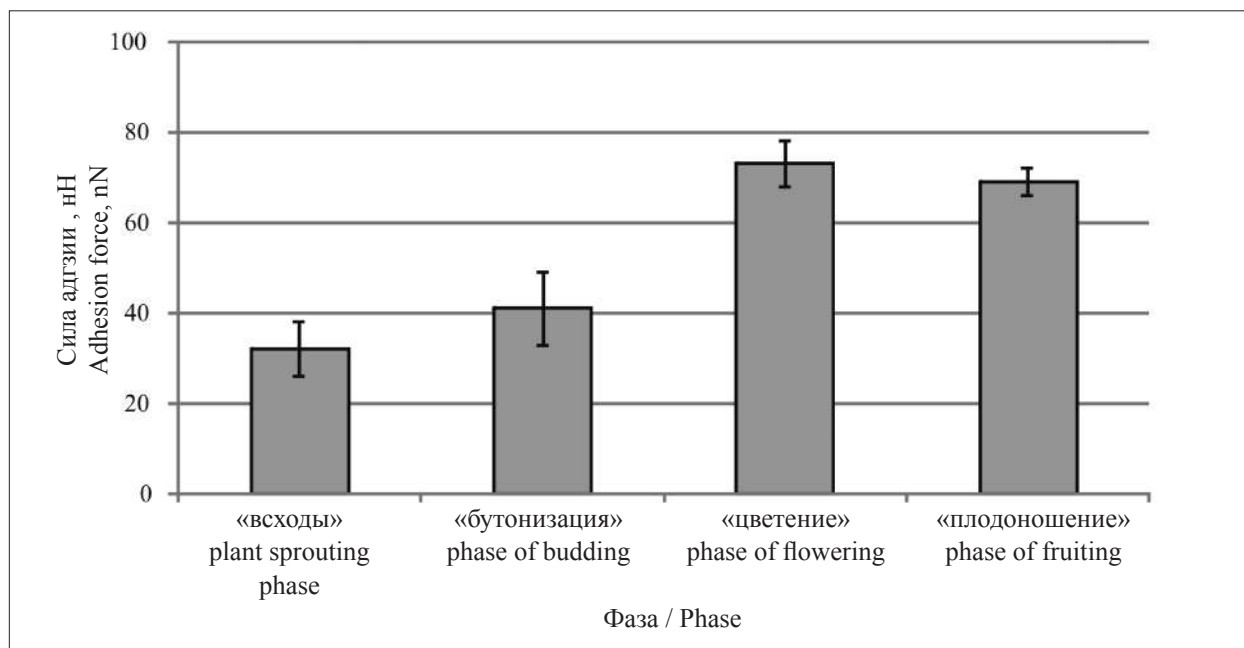


Рис. 2. Адгезивная активность *B. subtilis* в ходе вегетации *C. pepo* L.

Fig. 2. Adhesive activity of *B. subtilis* during different vegetative phase of plant development of *C. pepo* L.

о стабильности их упруго-механических свойств в ходе всех периодов вегетации растения.

Данные, полученные путём АСМ-идентификации поверхности клеток *B. subtilis*, регистрации и анализа силовых кривых, демонстрировали наращивание в процессе роста симбионта *C. pepo* L. адгезивной активности исследуемых штаммов (рис. 2).

На начальных этапах вегетации растения сила адгезии бактериальных клеток увеличивалась незначительно, в фазе «всходы» и «бутонизация» данный показатель составил $32,0 \pm 6,0$ и $41,0 \pm 8,0$ нН ($p < 0,05$) соответственно. У штаммов *B. subtilis*, выделенных из микробиоценоза ризосферы *C. pepo* L. в фазе «цветение» и «плодоношение», значения силы адгезии достоверно увеличивались по сравнению с первыми фазами ($73,0 \pm 5,0$ и $69,0 \pm 3,0$ нН соответственно; $p < 0,05$).

Работами ряда исследователей показано, что морфометрические и механические свойства, такие как упругость, вязкость и адгезивная активность являются одними из важнейших показателей структурно-функционального состояния бактерий [18]. Возможности АСМ не ограничиваются визуализацией объектов, метод позволяет исследовать их структурно-функциональное состояние. Установлено, что упруго-механические свойства бактерий обеспечивают их устойчивость к действию неблагоприятных факторов окружающей среды, таких как антибиотики, истощение питательной среды при длительном

культивировании. При действии этих факторов выявлены выраженная гетерогенность морфометрических показателей и дезорганизация поверхностных клеточных структур объекта исследования [19].

Известно, что шероховатость представляет собой совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности и является причиной того, что истинная площадь поверхности бактерий выше, чем геометрическая. Количественная оценка клеточной шероховатости поверхности микробных клеток имеет важное практическое значение, так как позволяет выявить влияние микрорельефа поверхности на устойчивость бактерий к воздействию внешних неблагоприятных факторов [20].

В работе впервые на примере модельного вида *B. subtilis* с помощью АСМ показано, что линейные параметры, упругость и шероховатость поверхности исследуемых бактерий в процессе формирования микробного сообщества ризосферы были стабильны, что указывает на постоянство структурной целостности бактерий и сохранение их функциональной активности в динамике развития растения симбионта.

Одним из факторов, определяющих возможность влияния микроорганизмов на развитие растений, является их способность адгезироваться на поверхности корней растений. У штаммов *B. subtilis*, выделенных в ходе вегетации *C. pepo* L., выявлено динамическое увеличение адгезивной активности,

максимально проявлявшееся у бацилл, выделенных из микробиоценоза ризосферы в фазе «цветение» и «плодоношение» растения. Повышение силы адгезии бацилл в процессе роста *C. pepo* L. способствует формированию взаимовыгодной растительно-микробной ассоциации с хозяином, что является одним из важных факторов ростостимулирующего влияния бацилл на растения. Видимо, в процессе развития растения происходит увеличение продукции растительных полисахаридов, что усиливает адгезию *B. subtilis* к корневой поверхности и способствует формированию и функционированию ризосферного комплекса.

Таким образом, использование технологии атомно-силовой микроскопии является эффективным инструментом исследования стабильности морфометрических и упруго-механических свойств *B. subtilis*, являющихся отражением их функциональной активности в процессе роста растения-симбионта.

References

1. Parfenov V.A., Yudin I.A. Atomic force microscopy and its applications in science, technology and restoration // Izvestiya SPbGETU "LETI". 2015. No. 9. P. 61–70 (in Russian).
2. Potaturkina-Nesterova N.I., Artamonova M.N., Kostishko B.B., Pchelintseva E.S., Nesterov A.S. The study of nanomechanical properties of biomembranes using atomic force microscopy // Nanotechnologies in Russia. 2015. V. 10. No. 7–8. P. 105–108 (in Russian).
3. Zhurina M.V., Kostrikina N.A., Parshina E.Yu., Strelkova E.A., Yusipovich A.I., Maksimov G.V., Plakunov V.K. Visualization of the extracellular polymeric matrix of *Chromobacterium violaceum* biofilms by microscopic methods // Microbiology. 2013. V. 82. No. 4. P. 502–509 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365613040162
4. Ivanchina N.V., Garipova S.R. Effect of plant growth promoting bacteria (PGPB) on the productivity and sustainability of plants // Eurasian Soil Science. 2012. No. 7. P. 87–95 (in Russian).
5. Antonyuk L.P. The communication in plant-bacterial symbioses: current status and prospects // The strategy of interaction of microorganisms and plants with the environment: materialy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh. Saratov, 2010. P. 6 (in Russian).
6. Pleskova S.N. Nanotechnological AFM morphometry of bacterial cells // Fizika tverdogo tela. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2013. No. 2. P. 34–38 (in Russian).
7. Obratsova E.A., Lukashov E.P., Zarubina A.P., Parkhomenko I.M., Yaminskiy I.V. Bactericidal action of single-walled carbon nanotubes // Moscow University Physics Bulletin. 2009. No. 3. P. 81–84 (in Russian).
8. Ignatov V.V. The molecular basis of associative relationships of microorganisms with plants: scientific publication. Moskva: Nauka, 2005. 262 p. (in Russian).
9. Boronin A.M. Rhizosphere bacteria of the genus *Pseudomonas* contributing plant growth and development // Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal. 1998. No. 10. P. 25–31 (in Russian).
10. Rashedul I.M. Characterization of plant growth-promoting traits of free-living diazotrophic bacteria and their inoculation effects on growth and nitrogen uptake of crop plants // J. Microbiol. Biotechnol. 2009. V. 19. P. 1213–1222. doi: 10.4014/jmb.0903.3028
11. Khairullin R.M., Burkhanova G.F., Sorokan A.V., Sarvarova E.R., Veselova S.V., Cherepanova E.A., Volgin S.G., Zamalieva F.F., Maksimov I.V. To the mechanisms of antiviral activity of *Bacillus* bacteria on potato plants // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 130–135 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-130-135
12. Feoktistova N.V., Mardanova A.M., Khadiyeva G.F., Sharipova M.R. Rhizospheric bacteria // Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki. 2016. No. 2. P. 207–224 (in Russian).
13. Melentyev A.I. Aerobic spore-forming bacteria *Bacillus* Coh. at agroecosystems. Moskva: Nauka, 2007. 147 p. (in Russian).
14. Artamonova M.N., Potaturkina-Nesterova N.I. Characterization of the microbial community of the rhizosphere and rhizoplanes *Cucurbita pepo* L. // Fundamentalnyye issledovaniya. 2013. No. 10. P. 3067–3070 (in Russian).
15. Tepper E.Z. Microbiology Workshop. Moskva: Drofa, 2004. 256 p. (in Russian).
16. Francis L W. Atomic force microscopy comes of age // Biol. Cell. 2009. V. 102. P. 133–143. doi: 10.1042/BC20090127
17. Tuson H.H., Auer G.K., Renner L.D., Hasebe M., Tropini C., Salick M., Crone W.C., Gopinathan A., Huang K.C., Weibel D.B. Measuring the stiffness of bacterial cells from growth rates in hydrogels of tunable elasticity // Molecular microbiology. 2012. V. 84. No. 5. P. 874–891. doi: 10.1111/j.1365-2958.2012.08063.x
18. Vasilchenko A.S., Yarullina D.R., Nikiyan A.N., Teslya A.V. Morphological and functional characteristics of the bacteria *Bacillus cereus* at various stages of the life cycle // Vestnik OGU. 2012. No. 10. P. 66–71 (in Russian).
19. Deng Z., Lulevich V., Liu F.-T., Liu G. Applications of atomic force microscopy in biophysical of cells // J. Phys. Chem. B. 2011. V. 114. No. 18. P. 5971–5982. doi: 10.1021/jp9114546
20. Artamonova M.N., Potaturkina-Nesterova N.I. The study of the surface topography of *Bacillus subtilis* under hypothermia // Fundamentalnyye issledovaniya. 2014. No. 11–5. P. 1035–1039 (in Russian).

Усовершенствование флуориметрического метода для определения полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды

© 2021. О. А. Плотникова, к. х. н., доцент,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
410054, Россия, г. Саратов ул. Политехническая, д. 77,
e-mail: plotnikova_o_a@mail.ru

Контроль содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в объектах окружающей среды является важной задачей экологического мониторинга, поскольку данные вещества даже в крайне малых концентрациях представляют угрозу для здоровья населения. Перспективными для определения ПАУ являются методы молекулярной спектроскопии: спектрофотометрические и люминесцентные. В работе представлены характерные спектры поглощения и флуоресценции ряда ПАУ, указаны их длины волн возбуждения и флуоресценции. Проведено сравнительное исследование метрологических характеристик определения представителя ПАУ (пирена) методами спектрофотометрии и флуориметрии в растворах, а также твёрдофазной флуориметрии с предварительным мицеллярным и сорбционным концентрированием на твёрдой матрице. Полученные данные подтверждают тот факт, что флуоресцентные методы характеризуются более низкими пределами обнаружения, чем методы, основанные на регистрации поглощения веществ. При этом применение твёрдофазной люминесценции на модифицированной неионогенным поверхностно-активным веществом Тритоном X-100 вискозной матрице позволяет проводить количественное определение пирена в диапазоне концентраций от 1 до 100 нг/мл, приводит к усилению аналитического сигнала и снижению предела обнаружения пирена в растворах до 0,8 нг/мл ($s_r = 0,05$), что особенно важно для разработки методов контроля экотоксикантов, содержащихся в окружающей среде в «следовых» концентрациях.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, спектроскопические методы, спектрофотометрия, флуориметрия, сорбционное концентрирование, твёрдофазная флуоресценция.

Improvement of fluorometric method for polycyclic aromatic hydrocarbons determination in environmental objects

© 2021. O. A. Plotnikova ORCID: 0000-0003-2715-044X
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, Russia, 410054,
e-mail: plotnikova_o_a@mail.ru

The selection of suitable pre-sample preparation and analysis methods for effective monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the environment is essential. An important task is to control the PAHs content in various media. These substances, even at low concentrations, can pose a threat to public health, can have carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects on living organisms. A distinctive feature of PAHs molecules is the ability to absorb energy and luminescence under the influence of UV radiation. In this regard, spectroscopic methods are promising for the PAHs determination.

The paper presents the characteristic absorption and fluorescence spectra of PAHs, and indicates their excitation and fluorescence wavelengths. An experimental study of the metrological characteristics of various spectroscopic methods has been carried out. The PAHs representative pyrene was determined by spectrophotometry and fluorimetry in solutions, as well as solid-phase fluorimetry with preliminary micellar and sorption concentration on a solid matrix. The use of aqueous micellar solutions of the nonionic surfactant Triton X-100 made it possible to enhance the analytical signals for the pyrene determination. The data obtained confirm the fact that the fluorescence method is characterized by a higher sensitivity than the method based on the registration of these substances' absorption. The linear range of concentrations determined by the spectrophotometric method is more significant in comparison with the fluorometric methods and amounts to 14–10000 ng/mL. At the same time, the combination of preliminary micellar and sorption concentration with solid-phase fluorescence on a modified by surfactants viscose matrix made it possible to reduce the detection limit of pyrene to 0.8 ng/mL ($s_r = 0,05$), which is especially important for the development of methods for controlling ecotoxicants contained in the environment in “trace” concentrations. The linear range of the determined concentrations by this method is 1–100 ng/mL.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), spectroscopic methods, absorption spectrophotometry, fluorimetry, sorption concentration, solid-phase fluorescence.

Технический прогресс, развитие промышленности и транспортных систем усугубляет проблему загрязнения окружающей среды (ОС). Особую опасность представляют такие экотоксиканты, как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Многие из представителей ПАУ способны оказывать канцерогенное, мутагенное и тератогенное воздействие на живые организмы даже при «следовых» концентрациях в ОС [1–4]. Встречаются ПАУ повсеместно: в воздухе, воде, почве, биоте. Различают как естественные, так и антропогенные источники образования ПАУ, причём вклад последних более значителен. Образуются ПАУ при сжигании и переработке органического сырья, нефтепродуктов, угля, древесины, мусора и т. д. [5–7].

Для эффективного контроля содержания ПАУ в ОС важным является выбор эффективных методов их обнаружения. Предпочтительны высокочувствительные методы инструментального анализа с низкими пределами обнаружения. Обычно применяются хроматографические методы с различными (в том числе флуоресцентными) способами детекции, хромато-масс-спектрометрия, капиллярный электрофорез, электрохимический анализ, иммунологические и другие методы [8, 9]. Основные недостатки современных методов – дорогостоящее аппаратное оснащение, большая длительность и сложность пробоподготовки и анализа, недостаточная чувствительность и селективность.

Поскольку ПАУ являются известными люминофорами, так как их молекулы способны к поглощению и эмиссии энергии под действием УФ-излучения, определёнными преимуществами для их анализа обладают методы молекулярной спектроскопии [10]. Достаточно распространённым для мониторинга объектов ОС на содержание различных веществ, в том числе и ПАУ, является спектрофотометрический метод [11–13]. Однако анализ многокомпонентных смесей данным методом без предварительного разделения веществ затруднён. Более чувствительным и селективным, чем УФ-спектрофотометрия, является люминесцентный анализ, широко применяемый для определения ПАУ [14]. При этом качественный и количественный анализ веществ можно проводить по их спектрам флуоресценции и фосфоресценции.

Целью данной работы являлось получение спектральных данных ряда ПАУ посредством регистрации спектров поглощения и флуоресценции, сравнительное исследование

метрологических характеристик определения представителя ПАУ (пирена) методами абсорбционной спектрофотометрии и флуориметрии в растворах, а также твёрдофазной флуориметрии с предварительным мицеллярным и сорбционным концентрированием на твёрдой матрице.

Объекты и методы исследования

В качестве ПАУ применяли препараты фирмы «Сигма-Алдрич», контроль состава которых проводился по спектрам поглощения и флуоресценции. Растворение препаратов проводили при помощи ультразвуковой ванны «ПСБ-4035-05» объёмом 4 л (ЗАО «ПСБ-Галс», г. Москва).

Для приготовления водно-мицеллярных растворов (ВМР) применялось неионогенное поверхностно-активное вещество (ПАВ) – полиоксиэтилен (10) моно-4-изооктилфенилового эфира – Тритон X-100 (ТХ-100) (фирмы «Сигма»), содержание основного вещества в котором составило $99 \pm 1\%$. Молекулярная формула ТХ-100 – $C_{34}H_{62}O_{11}$, критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) – $2,4 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Концентрация ТХ-100 в рабочих растворах соответствовала ККМ.

Для сорбции и твёрдофазной флуоресценции применялась гидрофобная матрица из нетканого вязкозного материала, плотностью – 70 г/м^2 , толщиной – $0,39 \text{ мм}$ («Ленфильтр», Санкт-Петербург). Вязкозный материал готовится производителем из концентрированного раствора ксантогената целлюлозы в разбавленном растворе NaOH (рис. 1). Выбор вязкозной матрицы обусловлен её структурой, сорбционными свойствами и люминесцентными характеристиками, полученными в результате предварительных сравнительных исследований различных матриц [15].

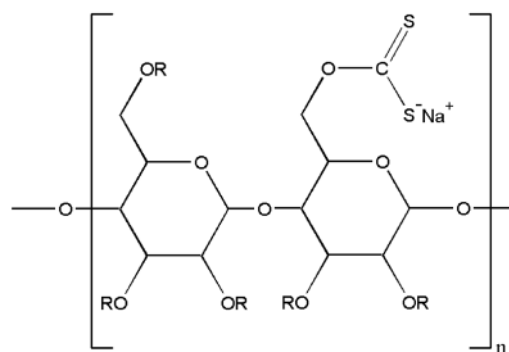


Рис. 1. Химическая формула ксантогената целлюлозы
Fig. 1. Chemical formula of cellulose xanthate

Сорбцию пирена на матрицу проводили в динамическом режиме в сорбционной колонке. Затем вязкую матрицу извлекали, сушили 5 мин при температуре 60 °С и регистрировали спектры флуоресценции.

Флуоресценция пирена в растворах и на матрице исследовалась на спектрофлуориметре «Флуорат-02-Панорама» (Россия). Фотометрический анализ растворов проводился на двухлучевом сканирующем УФ-ВИД спектрофотометре ПромЭкоЛаб ПЭ-6100УФ (Россия). Спектры поглощения и флуоресценции получены при концентрации ПАУ $5 \cdot 10^{-6}$ моль/л в водно-этанольных растворах в трёхкратной повторности опыта. Метрологические характеристики количественного определения пирена по спектрам поглощения и флуоресценции получены при повторности опытов, равной 3 для каждой концентрации пирена и 20 – для холостых проб.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось ранее, методы оптической спектроскопии перспективны для определения ПАУ, так как данные соединения содержат хромоформные группы, способные поглощать и излучать энергию с определёнными длинами волн. Спектры поглощения веществ обусловлены электронными переходами частиц вещества из основного состояния в возбуждённое, а спектры их люминесценции – обратным переходом из возбуждённого в основное. Спектры разных веществ достаточно специфичны, их форма зависит от структуры молекул вещества.

Экспериментально были получены спектры поглощения и флуоресценции ряда ПАУ, представленные на рисунке 2 (см. цв. вкладку).

Флуоресценция наблюдается при возбуждении молекул светом определённой длины волны, характерной для каждого соединения (табл. 1).

Далее было проведено сравнительное исследование спектрофотометрического и флуориметрического количественного опре-

деления одного из представителей класса ПАУ – пирена. Для этих целей регистрировались спектры поглощения и флуоресценции пирена в растворах и на вязкой матрице. Для улучшения аналитических характеристик применялось мицеллярное и сорбционное концентрирование.

Известно [17], что солибилизация гидрофобных веществ в микрофазе мицеллярной системы существенно увеличивает интенсивность аналитического сигнала и, как следствие, растёт чувствительность и улучшается селективность как фотометрического, так и люминесцентного анализа. Ранее было установлено [18], что максимальный сигнал флуоресценции ПАУ наблюдается при концентрациях ПАВ вблизи ККМ. Экспериментально этот факт был подтверждён при регистрации спектров флуоресценции пирена в ВМР неионогенного ПАВ ТХ-100, результаты представлены на рисунке 3а (см. цв. вкладку).

Также известно, что иммобилизация люминофора на твёрдой матрице способствует увеличению интенсивности флуоресценции за счёт снижения вероятности реализации процесса безызлучательной дезактивации энергии электронного возбуждения при более «жестком» закреплении молекулы [19, 20]. В данном случае молекулы сконцентрированы на поверхности, относительно изолированы, их столкновения ограничены, уменьшается вероятность процессов тушения, в связи с чем данный способ позволяет с высокой чувствительностью определять многие органические и неорганические вещества при комнатной температуре.

Предварительные исследования показали, что улучшить аналитические характеристики метода твёрдофазной флуоресценции позволяет сочетание солибилизации гидрофобных аналитов в микрообъёме мицелл с последующим динамическим сорбционным концентрированием и регистрацией аналитического сигнала непосредственно на твёрдой матрице [21, 22]. Также необходимо отметить, что при регистрации твёрдофазной флуоресценции

Таблица 1 / Table 1
Спектральные характеристики ПАУ [16] / Spectral characteristics of PAHs [16]

ПАУ / PAHs	$\lambda_{\text{возб.}}$, нм / $\lambda_{\text{ex.}}$, nm	$\lambda_{\text{фл.}}$, нм / $\lambda_{\text{fl.}}$, nm
Фенантрен / Phenanthrene	252	360
Антрацен / Anthracene	350	398
Флуорантен / Fluoranthene	354	464
Пирен / Pyrene	335	380
Хризен / Chrysene	264	380
Бенз[а]пирен / Benzo[a]pyrene	381	403

О. А. Плотникова «Усовершенствование флуориметрического метода для определения полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды ». С. 44.

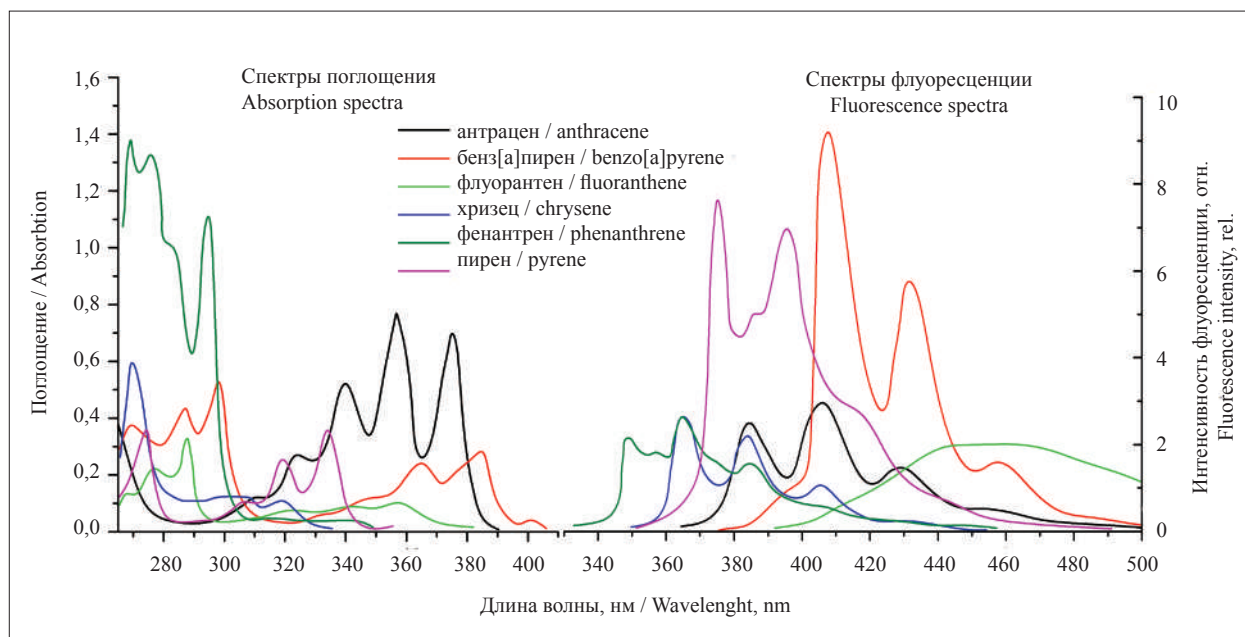


Рис. 2. Спектры поглощения и флуоресценции ПАУ
Fig. 2. Absorption and fluorescence spectra of PAHs

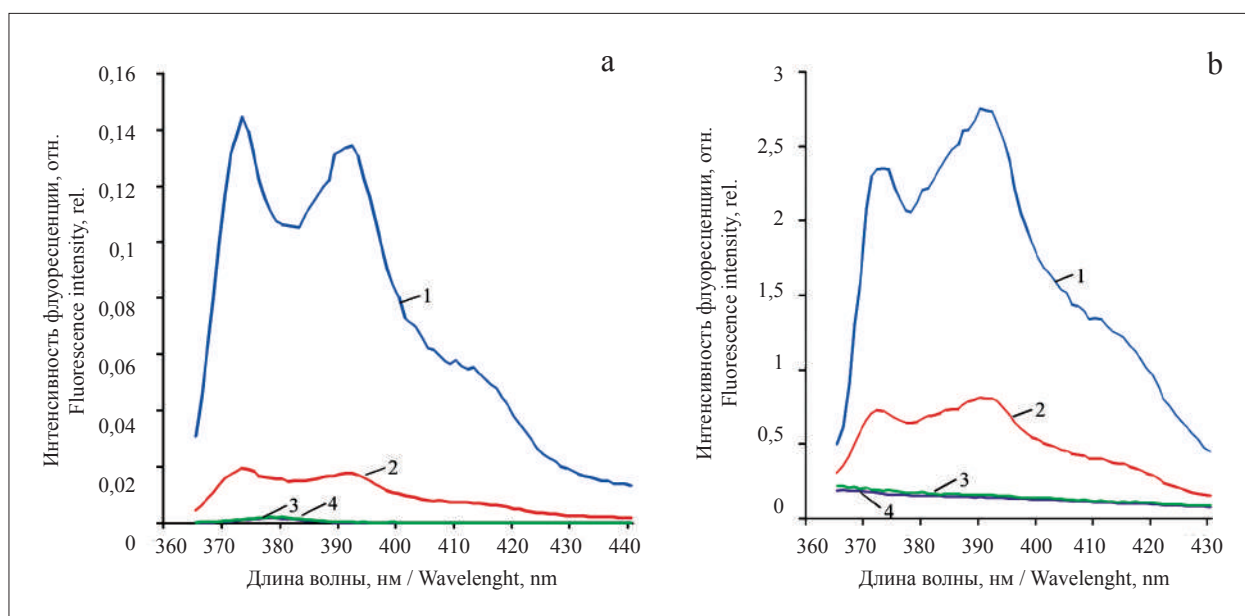


Рис. 3. Спектры флуоресценции в растворе (а) и на вязкой матрице (б):
 1 – пирен в ТХ-100; 2 – пирен в воде; 3 – ТХ-100; 4 – вода. $C_{\text{пирена}} = 2 \cdot 10^{-7}$ моль/л
Fig. 3. Fluorescence spectra in solution (a) and on a viscose matrix (b): 1 – pyrene in TX-100;
 2 – pyrene in water; 3 – TX-100; 4 – water. $C_{\text{pyrene}} = 2 \cdot 10^{-7}$ mol/L

Таблица 2 / Table 2

Характеристики определения пирена по спектрам поглощения и флуоресценции в водно-мицеллярном растворе TX-100 и на вязкой матрице / Characteristics of pyrene determination by absorption and fluorescences spectra in an aqueous micellar solution of TX-100 and on a viscose matrix

Способ определения Method of determination	Диапазон, нг/мл Range, ng/mL	ПО, нг/мл LOD, ng/mL	s_r
По спектрам поглощения в ВМР TX-100 Based on absorption spectra in aqueous micellar solutions of TX-100	14–10000	10	0,05
По спектрам флуоресценции в ВМР TX-100 / Based on fluorescence spectra in aqueous micellar solutions of TX-100	2–200	1,8	0,04
По спектрам твёрдофазной флуоресценции на вязкой матрице / Based on solid-phase fluorescence spectra on a viscose matrix	1–100	0,8	0,05

ПАУ необходимо учитывать вклад фонового сигнала модифицированной ПАВ матрицы в общий сигнал флуоресценции, который может достигать нескольких процентов в зависимости от модифицирующего агента.

На рисунке 3b представлены полученные экспериментально спектры флуоресценции пирена на вязкой матрице, при этом наблюдается значительное увеличение интенсивности аналитического сигнала при использовании предварительного концентрирования в мицеллах TX-100.

Были получены зависимости оптической плотности и интенсивности флуоресценции пирена в растворе и на вязкой матрице от его содержания в исходном растворе. В определённых диапазонах концентраций зависимости имеют линейный характер, что делает возможным применение данных методов для количественного определения пирена. В таблицу 2 сведены метрологические характеристики указанных методов: диапазон определяемых содержаний, предел обнаружения (ПО), относительное стандартное отклонение (s_r).

Экспериментальные данные показывают, что линейный диапазон концентраций пирена, определяемых спектрофотометрическим методом, более значителен по сравнению с флуориметрическими методами, но пределы обнаружения данным методом сравнительно невысоки. Применение сорбционного концентрирования на модифицированной ПАВ матрице совместно с регистрацией аналитического флуоресцентного сигнала непосредственно в фазе вязкого сорбента позволило значительно снизить предел обнаружения пирена.

Заключение

В заключении можно сделать вывод о том, что спектрофотометрические и люминес-

центные методы обладают определёнными преимуществами для анализа ПАУ, что подтверждается их широким использованием, как в самостоятельном исполнении, так и в составе различных детекторов, применяемых в экологическом мониторинге объектов ОС.

Анализируя полученные экспериментальные результаты, можно отметить, что флуоресцентный метод определения ПАУ характеризуется большей селективностью, чем спектрофотометрический, так как индивидуальные спектры флуоресценции ПАУ регистрируются при определённых длинах возбуждения, характерных для индивидуальных соединений. Однако в ряде случаев наблюдается перекрытие спектров как флуоресценции, так и поглощения отдельных ПАУ, что затрудняет их идентификацию. Повысить селективность люминесцентного метода определения ПАУ можно при совместном использовании, наряду с флуоресцентными, и фосфоресцентных спектров, а также применив метод резонансного переноса энергии и синхронную флуоресцентную спектроскопию.

Полученные метрологические характеристики определения пирена показывают перспективность метода анализа ПАУ, основанного на сочетании предварительного мицеллярного и сорбционного концентрирования с получением люминесцентного сигнала непосредственно в фазе сорбента. Данный способ позволяет проводить количественное определение пирена в диапазоне концентраций от 1 до 100 нг/мл, приводит к усилению аналитического сигнала и снижению предела обнаружения пирена в растворах до 0,8 нг/мл ($s_r = 0,05$), что особенно актуально в случае проведения экологического контроля содержания ПАУ при их следовом содержании в объектах ОС. Линейный диапазон определяемых концентраций данным методом составляет 1–100 нг/мл.

Анализ тенденций развития экологического анализа позволяет заключить, что по мере возрастания требований к информации при организации мониторинга ОС данных, получаемых одним методом, становится недостаточно. В связи с этим в последние годы начали развиваться подходы, основанные на совместном использовании разных методов оптической спектроскопии. Дальнейшие разработки видятся в направлении устранения мешающих воздействий компонентов и улучшения селективности и чувствительности методов для анализа многокомпонентных смесей в реальных объектах.

References

1. Ifegwu O.C., Anyakora C. Polycyclic aromatic hydrocarbons: Part I. Exposure // *Advances in Clinical Chemistry*. 2015. V. 72. P. 277–304. doi: 10.1016/bs.acc.2015.08.001
2. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016. V. 25. No. 1. P. 107–123. doi: 10.1016/j.ejpe.2015.03.011
3. Lawal A.T. Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review // *Cogent Environmental Science*. 2017. V. 3. No. 1. Article No. 1339841. doi: 10.1080/23311843.2017.1339841
4. Slezakova K., Castro D., Delerue-Matos C., Alvim-Ferraz M.D., Morais S., Pereira M.D. Impact of vehicular traffic emissions on particulate-bound PAHs: Levels and associated health risks // *Atmospheric Research*. 2013. V. 127. No. 7. P. 141–147. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.06.009
5. Srogi K. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2007. V. 5 No. 4. P. 169–195. doi: 10.1007/s10311-007-0095-0
6. Tsibart A.S., Gennadiev A.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: Sources, behavior, and indication significance (a review) // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. No. 7. P. 728–741. doi: 10.1134/S1064229313070090
7. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation // *Environmental Management*. 2017. V. 60. No. 4. P. 758–783. doi:10.1007/s00267-017-0896-2
8. Maystrenko V.N., Klyuev N.A. Environmental and analytical monitoring of persistent organic pollutants. Moskva: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. 328 p. (in Russian).
9. Zhang Q., Liu P., Li S., Zhang X., Chen M. Progress in the analytical research methods of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*. 2020. V. 43. No. 13–14. P. 425–444. doi: 10.1080/10826076.2020.1746668
10. Wang L., Pang S., Zhou G. Recent advances in spectroscopy technology for trace analysis of persistent organic pollutants // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. No. 17. Article No. 3439. doi: 10.3390/app9173439
11. Bosch Ojeda C., Sanchez Rojas F. Recent applications in derivative ultraviolet/visible absorption spectrophotometry: 2009–2011: A review // *Microchemical Journal*. 2013. V. 106. P. 1–16. doi: 10.1016/j.microc.2012.05.012
12. Rivera-Figueroa A.M., Ramazan K.A., Finlayson-Pitts B.J. Fluorescence, absorption, and excitation spectra of polycyclic aromatic hydrocarbons as a tool for quantitative analysis // *Journal of Chemical Education*. 2004. V. 81. No. 2. P. 242–245. doi: 10.1021/ed081p242
13. Abdel-Aziz O., El Kosasy A.M., El-Sayed Okeil S.M. Comparative study for determination of some polycyclic aromatic hydrocarbons 'PAHs' by a new spectrophotometric method and multivariate calibration coupled with dispersive liquid-liquid extraction // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. V. 133. P. 119–129. doi: 10.1016/j.saa.2014.05.059
14. Morales T.V., Esponda S.M., Rodriguez J.J.S., Aaron S.F., Aaron J.J. Luminescence methods for study and determination of pollutants in the environment // *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2010. V. 29. No. 1. P. 1–42. doi: 10.20450/mjce.2010.170
15. Plotnikova O.A., Mel'nikov A.G., Tikhomirova E.I., Adylova A.Zh. Matrix type effect on sorption concentration process and luminescent determination of pyrene // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2020. V. 14. P. 145–151. doi: 10.1134/S1990793120010261
16. Wandruszka R. Luminescence of micellar solutions // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 1992. V. 23. No. 3. P. 187–215. doi: 10.1080/10408349208050854
17. Santana Rodriguez J.J., Halko R., Betancort Rodriguez J.R., Aaron J.J. Environmental analysis based on luminescence in organized supramolecular systems // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2006. V. 385. No. 3. P. 525–545. doi: 10.1007/s00216-006-0342-4
18. D'achuck O.A. Ecological-analytical luminescent pyrene determination on a modified cellulose matrix // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2010. V. 53. No. 12. P. 14–17 (in Russian).
19. Fernandez-Sanchez J.F., Carretero A.S., Cruces-Blanco C., Fernández-Gutiérrez A. The development of solid-surface fluorescence characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons for potential screening tests in environmental samples // *Talanta*. 2003. V. 60. No. 2–3. P. 287–293. doi: 10.1016/S0039-9140(03)00100-0
20. Bortolato S.A., Arancibia J.A., Escandar G.M. A novel application of nylon membranes to the luminescent determination of benzo[a]pyrene at ultra-trace levels in water // *Analytica Chimica Acta*. 2008. V. 613. No. 2. P. 218–227. doi: 10.1016/j.aca.2008.03.004
21. D'achuck O.A., Mel'nikov G.V., Gubina T.I., Tikhomirova E.I. Cellulose matrix modification for ecotoxicants luminescence analysis // *Khimicheskaya fizika*. 2012. V. 31. No. 10. P. 21–24 (in Russian).
22. D'achuck O.A. Fluorescent sensor for polycyclic aromatic hydrocarbons toxicants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 3. P. 27–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-027-030

Влияние современных климатических изменений на региональные агроэкосистемы Республики Мордовия

© 2021. Б. И. Кочуров¹, д. г. н., профессор, в. н. с.,

П. И. Меркулов², к. г. н., профессор,

С. В. Меркулова², к. г. н., доцент,

С. Е. Хлёвина³, к. г. н., начальник,

¹Институт географии РАН,

119017, Россия, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29,

²Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,

430005, Россия, г. Саранск, ул. Советская, д. 24,

³Мордовский республиканский центр по гидрометеорологии

и мониторингу окружающей среды,

430027, Россия, г. Саранск, ул. Щорса, д. 39,

e-mail: camertonmagazin@mail.ru, pimerkulov@mail.ru, mordovgidromet@mail.ru

Рассмотрены основные тенденции современных изменений важнейших параметров биоклиматической системы Республики Мордовия. На основании пространственно-временного анализа взаимосвязи модификаций климатических составляющих сформулированы общие положения влияния происходящих изменений на региональные агроэкосистемы исследуемого региона. Урожайность сельскохозяйственных культур в большей степени коррелирует с экстремумами не отдельных климатических параметров, а таких интегральных показателей, как биоклиматический потенциал, модификации которого и отражают комплексное влияние изменений региональной климатической системы на продукционные возможности агроэкосистем.

Проведённые исследования выявили тенденцию к снижению биоклиматического потенциала на территории Мордовии на фоне увеличения суммы активных температур и увеличения продолжительности вегетационного периода, что связано со снижением годового количества осадков и, в целом, увлажнением территории. Расчёты индекса биологической эффективности климата показали значительную пространственную изменчивость, которая выражается в снижении индекса с северо-запада на юго-восток республики.

Ключевые слова: изменения климата, среднегодовая температура, среднегодовая сумма осадков, коэффициент увлажнения, коэффициент линейного тренда, первичная биопродуктивность ландшафтов.

Influence of modern climate changes on the regional agroecosystems of the Republic of Mordovia

© 2021. B. I. Kochurov¹ ORCID: 0000-0002-8351-3658, P. I. Merkulov² ORCID: 0000-0002-5622-5909

S. V. Merkulova² ORCID: 0000-0002-3051-119X, S. E. Hljovina³ ORCID: 0000-0002-7217-0637

¹Institute of Geography of Russian Academy of Sciences,

29, Staromonetnyy Pereulok, Moscow, Russia, 119017,

²N. P. Ogarev's Mordovian State University,

24, Sovetskaya St., Saransk, Russia, 430005,

³Mordovian Centre of Hydrometeorology and Monitoring Environment,

39, Shchorsa St., Saransk, Russia, 430027,

e-mail: camertonmagazin@mail.ru, pimerkulov@mail.ru, mordovgidromet@mail.ru

The article describes main trends of modern changes in the most important parameters of the ecological and climate system of the Republic of Mordovia. Based on the spatio-temporal analysis of the relationship between climate component modifications, the authors formulate general provisions with regard to the changes that are occurring on regional agroecosystems in the studied region. The yield of agricultural crops correlates more with integral indicators such as bioclimatic potential, the modifications of which reflect the complex influence of changes in the regional climate system on the production capacities of agroecosystems rather than the extremes of individual climate parameters.

The conducted research revealed a tendency to decreasing the bioclimatic potential on the territory of Mordovia against increasing in the sum of active temperatures and an increasing the duration of the vegetative period, which is associated with a decrease in the annual amount of precipitation and, in general, humidification of the territory, which are the main factors in the climate production conditions in Mordovia's current climatic conditions.

Calculations of the biological efficiency index of the climate showed a significant spatial variability, which is expressed in a decrease the index from the north-west to the south-east of the republic.

Nevertheless, for most farms in the administrative regions of the republic, you can state a high efficiency of using the ecological and bioclimatic potential of landscapes, which affects the volume of agricultural production.

Keywords: climate changes, average annual temperature, average annual sum of a precipitation, factor of moistening, factor of a linear trend, primary bioproductivity of landscapes.

Развитие аграрного производства находится в тесной взаимосвязи с функционированием природных компонентов вмещающего ландшафта. Среди прочих природных факторов возделываемой территории биоклимат в значительной степени определяет урожай сельскохозяйственных культур, средний уровень продуктивности, её межгодовую изменчивость, качество полученной продукции и т. д.

Определение уровня использования биоклиматического потенциала вмещающего природно-территориального комплекса позволяет оценить эффективность функционирования региональных сельскохозяйственных ландшафтов [1–5].

На фоне наблюдающихся в настоящее время модификаций характеристик тепло- и влагообеспеченности, традиционно экономически эффективные механизмы управления могут оказаться несостоятельными и потребовать дополнительных капиталовложений. Для объективных оценок степени использования биоклиматических ресурсов необходимо введение специальных поправочных коэффициентов, которые будут учитывать прецеденты и повторяемость проявления экстремальных значений элементов биоклиматического потенциала территории [6–9].

Исследование изменений климатических факторов, воздействующих на продуктивность агроэкосистем, особо актуально для Мордовии, как для сельскохозяйственного региона, где в последние десятилетия всё чаще наблюдается ранее небывалый пространственно-временной сценарий агрометеорологических условий, сигнализирующий о высокой степени уязвимости агроэкосистем, их сильной чувствительности к изменениям современного климатического режима.

В данном исследовании была проведена оценка эколого-биоклиматического потенциала агроландшафтов Республики Мордовия в условиях современных климатических изменений для оптимизации практики управления продуктивностью агроэкосистем региона.

Материалы и методы исследования

В целом климат Мордовии позволяет возделывать разнообразные зерновые, технические, овощные культуры, картофель, заниматься садоводством, развивать многоотраслевое животноводство.

На территории республики формируются относительно однородные агроклиматические условия, что определяет большое влияние на территориальную организацию отраслевого ведения сельского хозяйства такого компонента природной среды, как почвы.

В сходных условиях теплообеспеченности продуктивность растений определяется степенью влагообеспеченности, а в сходных условиях влагообеспеченности – общей теплообеспеченностью. Практически важно учитывать совместное влияние тепло- и влагообеспеченности на продуктивность растений. Такое влияние выражается посредством расчёта биоклиматический потенциал, характеризующего комплекс климатических факторов, определяющих возможности сельскохозяйственного производства. С ним связаны возможный набор сельскохозяйственных культур, биологическая продуктивность, эффективность затрат, территориальная специализация, зональные особенности агрономических мероприятий, меры по охране и улучшению окружающей среды [10, 11].

При оценке влияния изменений климата региона на продукционные возможности агроэкосистем нельзя оставить без внимания многолетний ход тренда биоклиматического потенциала, позволяющий установить модификации возможной биологической продуктивности [12, 13]. Информационной базой исследования послужили многолетние данные метеорологических параметров по территории Мордовии, собранные на метеостанциях Мордовского Гидрометцентра и обработанные традиционными математическими методами.

Для сравнительной оценки общей биологической продуктивности ландшафтов республики наи-

более приемлемым является климатический индекс биологической продуктивности (Бк), являющийся производным от БКП [14]:

$$БКП = K_p = \frac{\sum tak}{\sum tak(баз)},$$

где K_p – коэффициент роста по годовому показателю атмосферного увлажнения; $\sum tak$ – сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации в данном месте; $\sum tak(баз)$ – базисная сумма средних суточных температур воздуха за период активной вегетации, т. е. сумма, относительно которой проводится сравнительная оценка.

С учётом дифференциации изучаемой территории по природно-климатическим, рельефо- и почвообразующим, геохимическим показателям для каждого ландшафтного выдела был рассчитан интегральный показатель эколого-биоклиматической продуктивности ландшафтов по формуле:

$$C = 100 \cdot \sum \frac{C_g}{Q},$$

где C – продуктивность ландшафта (%), C_g – балл по каждому показателю, Q – максимально возможная сумма баллов, g – порядковый номер показателя, n – количество показателей [15].

Результаты и обсуждение

Анализ динамики БКП территории Мордовии позволяет фиксировать объективно существующие в последние десятилетия нисходящие тенденции этого показателя. То есть, повышение сумм активных температур и увеличение продолжительности вегетационного периода, наблюдающиеся в последнее десятилетие, не способны скомпенсировать уменьшение сумм осадков и в целом показателей увлажнения территории, которые в условиях наблюдающихся климатических изменений республики являются, по-видимому, первостепенными факторами, определяющими продукционные возможности климата.

Отмечено наличие ландшафтной дифференциации БКП территории республики: динамика анализируемого параметра для метеостанции «Саранск» обладает меньшей вариабельностью и скачкообразностью по сравнению с метеостанцией «Темников», что свидетельствует о большей стабильности БКП центральной Мордовии.

Однако стабильные по БКП в многолетнем плане агроэкосистемы центральной Мордовии сильнее реагируют на экстремально жаркие и сухие условия летнего периода, что доказано снижением показателя БКП этой части республики в 2010 г. до значений 0,9–1,0, соответствующих низкой биопродуктивности по шкале [14].

Урожайность сельскохозяйственных культур в большей степени коррелирует с экстремумами не отдельных климатических параметров, а таких интегральных показателей, как БКП, модификации которого и отражают комплексное влияние изменений региональной климатической системы на продукционные возможности агроэкосистем.

Повышающийся в последние десятилетия процент доли лет с пониженным БКП в центре исследуемой территории может повлечь за собой в отрасли растениеводства ряд негативных последствий, и, следовательно, должен быть предупреждён аграриями республики системой мероприятий, направленных на повышение устойчивости агроэкосистем к аномальным условиям летнего периода.

Высокую биологическую продуктивность при высоком значении БКП можно ожидать только в случаях максимально адаптированного к меняющемуся климату, эффективного в экологическом и экономическом аспектах использования имеющихся климатических ресурсов, что, в первую очередь, связано с высокой культурой земледелия.

В целях разработки балльной шкалы для оценки эколого-биоклиматического потенциала ландшафтов Мордовии необходим комплексный анализ каждой группы факторов с присвоением баллов, ранг которых соответствует интенсивности влияния фактора на биопродуктивные возможности ландшафта в целом.

По качественному показателю почвообразующих пород, от которых почва наследует гранулометрический, минералогический и химический составы, а также физические свойства, на территории Мордовии выделяются суглинистые, песчаные и щебенистые почвенные разности. Суглинистые почвы обладают большей поглотительной, буферной и водоподъёмной способностью по сравнению с песчаными и щебенистыми. Следовательно, почвы с лёгким механическим составом и повышенной щебнистостью обладают меньшим продуктивным потенциалом.

Рельеф возделываемых угодий формирует температурный и ветровой режимы, почвен-

ные и гидрологические условия. Экспозиция и крутизна склонов влияют на количество и распределение солнечной радиации. В условиях риска увеличения частоты проявления засух, склонам южной экспозиции в процессе балльной оценки факторов биопродуктивности ландшафтов вычитался один балл.

При анализе принадлежности исследуемой территории к геохимическим катенам минимальные значения БКП характерны для элювиальных (водораздельных) ландшафтов, куда поток вещества поступает лишь из атмосферы.

Существуют некоторые определённые условия, при которых ландшафт можно считать оптимальным для жизнедеятельности и здоровья населения. Прежде всего, это большая экологическая эффективность, зависящая от экологического потенциала ландшафта, учитывающего температуру, осадки, испаряемость, а, следовательно, и интенсивность биогеохимических процессов [16]. В качестве меры экологического потенциала рассматривались многие показатели. Было установлено, что наиболее подходящим считается индекс биологической эффективности климата (ИБЭЖ), предложенный [17]. Он синтезирует важнейшие климатические параметры: атмосферные осадки, температуру и относительную влажность воздуха, рассматриваемые в их годовом ходе, а также годовую теплообеспеченность. В целом ИБЭЖ хорошо выражает общий экологический фон и, по оценкам [17], зоне экологического оптимума соответствует показатель, равный 22.

Расчёты на основе усреднённых данных периода Всемирной метеорологической организации 1960–1990 гг. иллюстрируют широтную изменчивость ИБЭЖ, испаряемость увеличивается с севера на юг, а коэффициент увлажнения, напротив, уменьшается. Следует отметить, что в течение данного периода наблюдается значительное влияние западных воздушных масс на параметры ИБЭЖ, выражающееся в изменении показателя с северо-запада на юго-восток республики.

При расчёте почвенной составляющей БКП агроценозов республики учитывались показатели продуктивной (активной) влаги.

Чернозёмные почвы обладают большей влагоёмкостью, так как в них накапливается больше продуктивной влаги. У песчаных почв низкая влагоёмкость, в них содержится всего 42–48% влаги от годового количества осадков. Различная влагоёмкость почв обуславливает и значительное колебание продуктивной влаги по агроклиматическим районам.

Наибольшую площадь на исследуемой территории занимают дерново-подзолистые, серые лесные и чернозёмные почвы. Согласно методике агроэкологической оценки [15], на основе продуктивных особенностей (гумусированности, буферности к солям и щелочам, влагоёмкости) элементарных почвенных ареалов для территории Мордовии характерно пространственное распределение уровня продуктивности почвенного потенциала. При этом самый низкий балл присвоен бесструктурным пескам и подзолам, самый высокий – чернозёмам луговым и аллювиальным почвам.

Кроме того, в процессе комплексной оценки эколого-климатического потенциала ландшафтов Республики Мордовия было уделено внимание эрозии почв, как негативному лимитирующему фактору, последствием которого является снижение запасов органического вещества в почве, а также снижение общей устойчивости ландшафта. Активные эрозионные процессы наблюдаются преимущественно на востоке республики. Особенно слабоустойчивы к плоскостной эрозии дерново-подзолистые и серые лесные почвы. Снижение потенциальной продуктивности земель в результате эрозии почв также требует увеличения затрат при сельскохозяйственном производстве.

Для ландшафтов восточной части Мордовии в качестве лимитирующего фактора учитывалась экспозиция склона. В условиях выхода на поверхность меловых и палеоген-неогеновых пород в щебнистых почвах на южном склоне теряется почвенная влага и соответственно уменьшается биопродуктивность.

При относительной однородности агроклиматических условий территории Мордовии можно, тем не менее, утверждать, что чем выше эколого-биоклиматический потенциал отдельных ландшафтов, тем выше её естественные продуктивные возможности, её устойчивость к аномальным внешним условиям. Таким образом, можно констатировать, что и отдельные компоненты биопродуктивности будут существенно влиять на территориальную организацию отраслевого ведения сельского хозяйства республики.

Ранжирование выделенных показателей по степени их выраженности (интенсивности) позволило создать шкалу их балльной оценки (таб.).

В итоге, при подсчёте общей суммы баллов отдельный ландшафтный выдел получает максимум 14 баллов, минимально – 3 балла. С учётом дифференциации изучаемой террито-

Таблица / Table

Шкала балльной оценки основных ландшафтных показателей биологической продуктивности
Scale of a point assessment of the main landscape indicators of biological productivity

Показатель продуктивности Index of productivity	-1 балл -1 point	1 балл 1 point	2 балла 2 points	3 балла 3 points	4 балла 4 points
Индекс биологической эффективности климата Climate biological efficiency index	–	–	17–18 относительно благоприятные с заметным недостатком влаги relatively favorable with a noticeable lack of moisture	19–20 относительно благоприятные с пониженным увлажнением relatively favorable with reduced moisture	выше 20 благоприятные с достаточным увлажнением above 20-favorable with sufficient moisture
Геохимическое положение ландшафта Geochemical position of the landscape	–	элювиальное (водораздельные) eluvial (watershed)	трансаккумулятивное transalkylation	аккумулятивное accumulative	–
Механический состав почв Soil mechanical composition	–	щебенистый crushed	песчаный sandy	суглинистый loamy	–
Тип почв (гумусированность почв, %) Soil type (soil humus, %)	–	дерново-подзолистые, светло-серые лесные sodpodzolic, light gray forest (1–2)	серые лесные, тёмно-серые лесные gray forest, dark gray forest (3–4)	чернозёмы оподзоленные, чернозёмы выщелоченные ashed, leached chernozem (5–6)	чернозёмы карбонатные, чернозёмы луговые, аллювиальные carbonate chernozems, meadow chernozems, alluvial (> 6)
Лимитирующие факторы Limiting factor	эродированные земли eroded lands	–	–	–	–
	склоны южной экспозиции the southern slopes	–	–	–	–

Примечание: прочерк означает, что данный показатель не учитывается.
Note: a dash means that this indicator is not taken into account.

рии по биоклиматическим, рельефо- и почво-образующим, геохимическим показателям для каждого ландшафтного выдела были рассчитаны показатели эколого-биоклиматического потенциала ландшафтов Мордовии. Максимальные показатели (более 70%) характерны для западной Мордовии на водоразделе рек Мокши и Вада, северным районам центральной части республики, северо-восточным районам в бассейне Алатыря. Практически

вся остальная территория республики, за исключением юго-восточной части и отдельных участков на юге, имеет показатели эколого-биоклиматического потенциала в пределах 50–70%. В юго-западных районах и на юге в бассейне реки Мокши этот показатель варьирует от 30 до 50%. И только на незначительных по площади участках юго-восточной Мордовии значения эколого-биоклиматического потенциала менее 30%.

Заключение

Проведённые исследования выявили на территории Мордовии тенденцию понижения БКП на фоне повышения сумм активных температур и увеличения продолжительности вегетационного периода, что связано с уменьшением годового количества осадков и в целом показателей увлажнения территории, являющиеся в современных климатических условиях Мордовии основными факторами продукционных возможностей климата.

Расчёты индекса биологической эффективности климата показали значительную его пространственную изменчивость, которая выражается в уменьшении показателя с северо-запада на юго-восток республики.

Результаты анализа эколого-биоклиматического потенциала территории республики показали, что более 30% площади Мордовии имеет высокий потенциал биопродуктивности, около 50% – средний и порядка 20% – низкий потенциал. Тем не менее, для большинства хозяйств административных районов республики можно констатировать высокую эффективность использования эколого-биоклиматического потенциала ландшафтов, что сказывается на объёмах производства сельскохозяйственной продукции.

References

1. Snakin V.V., Hrisanov V.R. Bioproductivity as a factor of landscape sustainability // *Ispolzovanie i okhrana prirodnykh resursov v Rossii*. 2001. No. 10. P. 60–67 (in Russian).
2. Zoidze E.K. Evaluation of agro-climatic resources of potato productivity in the non-Chernozem zone of the European territory of the USSR // *Meteorologiya i gidrologiya*. 1973. No. 5. P. 84–92 (in Russian).
3. Tarariko Ju.A. Formation of sustainable agroecosystems: theory and practice. Kiev: Agrarnaya nauka, 2005. 508 p. (in Russian).
4. Mueller N.D. Closing yield gaps through nutrient and water management // *Nature*. 2012. V. 490. P. 254–257. doi: 10.1038/nature11420
5. Kleschenko A.D., Maracchi G., Perarnaund V. Applications of geographical information systems and remote

sensing in agrometeorology // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000. No. 103. P. 119–136.

6. Kleschenko A.D., Zoidze E.K., Boken V.K. Monitoring agricultural drought in Russia // *Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford: University Press, 2005. P. 196–208.

7. Boer G.J., Yu B. Climate sensitivity and climate state // *Climate Dynamics*. 2003. V. 21. P. 167–176. doi: 10.1007/s00382-003-0323-7

8. Govindasamy B., Thompson S., Duffy P.B., Caldeira K., Delire C. Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere // *Geoph. Res. Lett.* 2002. V. 29. No. 22. P. 2061–2064. doi: 10.1029/2002GL015911

9. Merkulova S.V., Merkulov P.I., Sergejcheva S.V. Dynamics of the climate regime and its regional aspects (on the example of the Republic of Mordovia) // *Regional effects of global climate change (causes, consequences, forecasts)*. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2012. P. 153–155 (in Russian).

10. Hljovina S.E. Dangerous hydrometeorological phenomena in the territory of Mordovia in the conditions of modern global warming // *Bulletin of the University of Mordovia*. 2005. No. 1–2. P. 136–138 (in Russian).

11. Merkulov P.I., Kochurov B.I., Merkulova S.V. Ecodiagnostics of ethno-natural processes in the European region of Russia. Moskva: INFRA-M, 2017. 201 p. (in Russian). doi: 10.12737/22015

12. Tooming H.G., Karing P.H. Agroclimatic conditions and productivity of agricultural crops. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983. 105 p. (in Russian).

13. Global climate change and risk forecast in agriculture / Eds. A.L. Ivanov, V.I. Kiryushin. Moskva: Rossiyskaya akademiya selskokhozyaystvennykh nauk, 2009. 517 p. (in Russian).

14. Shashko D.I. Agro-climatic resources of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985. 247 p. (in Russian).

15. Agroecological assessment of lands, design adaptive-landscape systems of agriculture and agricultural technologies: Methodical manual / Eds. V.I. Kiryushin, A.L. Ivanov. Moskva: Rosinformagrotekh, 2005. 784 p. (in Russian).

16. Isachenko A.G. Introduction to environmental geography. Sankt-Peterburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2003. 192 p. (in Russian).

17. Isachenko A.G. The intensity of functioning and productivity of geosystems // *News of the Russian Academy of Sciences. Series geographical*. 1990. No. 5. P. 5–17 (in Russian).

Природно-климатические факторы в экологическом зонировании г. Иркутска

© 2021. Е. В. Максютова, к. г. н., с. н. с.,
Л. Б. Башалханова, к. г. н., с. н. с.,
Л. М. Корытный, д. г. н., г. н. с., А. А. Сороковой, к. г. н., с. н. с.,
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 1,
e-mail: emaksyutova@irigs.irk.ru, ldm@irigs.irk.ru,
kor@irigs.irk.ru, geomer@irigs.irk.ru

Анализ природно-климатических особенностей формирования экологического состояния атмосферного воздуха в г. Иркутске выявил, что его хроническое загрязнение связано с многолетним ежегодным превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) по 5–6 опасным загрязняющим веществам, со стабильным присутствием взвешенных веществ (до 2,4 ПДК) и бенз[а]пирена (до 7,8 ПДК). Основной объём выбросов загрязняющих веществ осуществляется в течение продолжительного отопительного сезона.

Проведено зонирование территории города по степени возможного воздействия рельефа и преобладающих типов подстилающей поверхности (водная, лесопарковая, застройка каменная, деревянная) на температуру воздуха в приземном слое атмосферы. Зона сильного влияния включает три типа микроклимата низин с отклонениями температуры воздуха в январе от 1,9 до -3,6 °С от базовой метеостанции «Иркутск, обсерватория». Застойные явления в этой зоне могут способствовать формированию интенсивного загрязнения атмосферы жилых и рекреационных территорий. Вершинные поверхности из-за большей активности воздухообмена находятся под слабым воздействием факторов среды. Зона умеренного воздействия на склонах и выровненных территориях отражает локальные особенности подстилающей поверхности и типов застройки.

Результаты полученного зонирования могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий и для улучшения условий проживания населения. Даны рекомендации по диверсификации топливного баланса предприятий в пользу газа.

Ключевые слова: состояние атмосферного воздуха, микроклимат города, температура воздуха, типы подстилающей поверхности, зонирование городской среды.

Natural-climatic factors in ecological zoning of the city of Irkutsk

© 2021. E. V. Maksyutova ORCID: 0000-0002-0373-2309[†]
L. B. Bashalkhanova ORCID: 0000-0002-0627-9714[†]
L. M. Korytny ORCID: 0000-0001-6022-1997[†] A. A. Sorokovi ORCID: 0000-0001-8987-7068[†]
V. B. Sochava Institute of Geography of Siberian Branch RAS (IG SB RAS),
1, Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: emaksyutova@irigs.irk.ru, ldm@irigs.irk.ru,
kor@irigs.irk.ru, geomer@irigs.irk.ru

An analysis is made of the natural-climatic characteristics of the formation of the ecological status of the atmospheric air in the city of Irkutsk. It is found that its chronic pollution is associated with a long-term annual exceedance of MAC for 5 to 6 hazardous pollutants, and with a persistent presence of suspended substances (up to 2.4 MAC) and benzo[a]-pyrene (up to 7.8 MAC). The main volume of pollutants emissions corresponds to a long-lasting heating season (mid-September – mid-May).

A zoning of the city territory was carried out according to the degree of the possible effect of topography and prevailing type of underlying surface (water, forest-park, and stone and wooden buildings) on air temperature in the atmospheric ground layer.

The zone of strong influence includes three types of microclimate of lowlands, with the January temperature deviations 1.9 to -3.6 °C from the Irkutsk base weather station. Stagnant phenomena in this zone can promote formation of intense air pollution of residential and recreational territories. Because of a high activity of the air exchange, the summit surfaces experience a weak impact of the environmental factors. The zone of moderate impact on slopes and planate ter-

ritories reflects the local characteristics of the underlying surface. The dominant influence of stone buildings and roads on air temperature is most clearly pronounced in the center of the city on the right bank of the Angara River; on the left bank it is smoothed out by the influence of forested areas. With distance from the center of the city, similar air temperatures are typical for the slopes of different gentleness and aspect. This occurs as a result of significant differences in heat exchange in the dominant types of underlying surface.

Keywords: atmospheric air condition, microclimate of the city, air temperature, types of underlying surface, zoning of the urban environment.

Города Сибири испытывают значительное антропогенное воздействие, которое обусловлено не только уровнем их промышленного развития, но и особенностями формирования климата. Мощность длительных сезонных и суточных инверсий способствует замедлению процессов перемешивания и рассеивания поступающих в атмосферу примесей [1]. Между тем, в приземной атмосфере их локализация может корректироваться микроклиматическими различиями.

Опыт исследования микроклимата на стационарах Института географии СО РАН показал общие тенденции и глубину температурных вариаций в различных ландшафтах Сибири. Так, в условиях степного засушливого климата и в ландшафтах предгорий Западного Саяна температура воздуха летом в предутренние часы, а также зимой в понижениях рельефа на 2–3 °С ниже, чем на склонах и вершинных поверхностях, что обусловлено наложением неодинаковой интенсивности радиационного выхолаживания и стоковых процессов [2]. Проявление такого эффекта обретает особую значимость в городской среде, где он может одновременно выступать причиной формирования локальных зон загрязнения атмосферы. Выявление территорий с различным качеством внутри городской среды является одним из важнейших элементов при разработке стратегии оздоровления населения [3].

Климатические характеристики городов (радиационные, термические, влажностные и аэродинамические) существенно выделяются на фоне окружающих незастроенных территорий [4, 5]. Их изменения обусловлены воздействием ряда городских особенностей: уменьшением прозрачности атмосферы, трансформацией характера подстилающей поверхности и связанных с ним процессов теплообмена. В атмосферный воздух города поступают различные примеси от промышленных предприятий, транспорта и других источников, что способствует его хроническому загрязнению.

С 70-х годов прошлого столетия г. Иркутск не менее 40 раз входил в список городов с

самым загрязнённым воздухом и ростом заболеваемости населения новообразованиями и болезнями органов дыхания [6]. При оценке рассеивания примесей от объектов теплоэнергетики показано, что изолинии абсолютных концентраций и частот превышения предельно допустимых среднесуточных концентраций загрязняющих веществ (диоксида азота, сажи, диоксида серы и пыли в декабре) преимущественно вытянуты с северо-западной части города к юго-восточной по направлению основного потока воздушных масс [7].

Однако низкая повторяемость ветров, способных активизировать самоочищение атмосферы, орографическая расчленённость рельефа, с превышением высот до 140 м, контрасты подстилающей поверхности могут внести коррективы на сосредоточение локальных зон загрязнения.

Цель работы – дифференциация территории города по влиянию факторов среды на состояние атмосферы для её использования в дальнейшем при разработке природоохранных мероприятий и улучшения условий проживания населения.

Объекты и методы исследований

Для учёта совокупности всех причин, способствующих формированию качества атмосферного воздуха, применён комплексный подход, основанный на картографо-геоинформационном анализе природных и антропогенных факторов. Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников, уровень загрязнения атмосферы города рассмотрены по официальным статистическим данным [8, 9].

Проведён анализ рельефа, который позволил выделить геотопологические типы местоположений в пределах города: низины, вершины, склоны, определить высоты и крутизну склонов. На полученную основу нанесены отклонения температур воздуха микроклиматического исследования прошлых лет [10] и данные современных наблюдений на 4 метеопостах, где установлены автоматические станции контроля за качеством атмосфер-

ного воздуха (ФГБУ «Иркутское УГМС»). Систематизация этой информации с учётом микроклиматических закономерностей позволила выделить контуры с количественными значениями отклонений температуры воздуха (Δt , °C) от аналогичных данных наблюдений на метеостанции «Иркутск, обсерватория» [11]. Оценка влияния типов подстилающей поверхности (водные, застройка каменная, деревянная, лесопарковая) выполнена методом сравнительного анализа (в % от общей площади города).

Результаты и обсуждение

Рельеф города холмистый, наиболее пониженными местами (420–450 м над ур. м.) в городе являются его центр, долины рек Иркутта, Ангары, Ушаковки, Каи. Склоны и выровненные поверхности имеют высоты 440–500 м, вершины – более 500 м. Наиболее возвышенными являются северо-восточные районы с превышением высот до 100 м и средней крутизной склонов 3–5,4°. Левобережье Ангары до впадения Иркутта и юго-западные окраины города отличаются средней крутизной склонов 3,8–4,2° при умеренных колебаниях высот (440–480 м). Крутизна склонов плоских и округлых вершин (460–480 м), характерных для западных окраин города

и междуречья Ангары и Ушаковки, составляет в среднем около 2°.

Ежегодно в атмосферу города поступают выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников – от 52 тыс. т в 2008 г. до 70,5 в 2018 г. [8]. Ведущими источниками являются предприятия теплоэнергетики и автотранспорт, которые обеспечивают соответственно около 40 и 50–60% [9] валовых общегородских выбросов. При этом в среднем за год концентрация в атмосфере города превышает гигиенические нормативы по 5–6 загрязняющим веществам (бенз[а]пирен, формальдегид, оксиды азота, серы, углерода, сажа и взвешенные вещества). Основной объём выбросов загрязняющих веществ осуществляется в течение продолжительного отопительного сезона одновременно с формированием и господствующим положением Сибирского антициклона (ноябрь – март), с которым связаны замедление процессов рассеяния примесей в атмосфере.

Стабильно высокие (рис. 1) концентрации взвешенных веществ (до 2,4 ПДК) и бенз[а]пирена (до 7,8 ПДК) обусловлены, прежде всего, низким качеством топлива передвижных и стационарных источников выбросов. Топливный баланс предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК) мало меняется и более чем на 84 % состоит из бурого

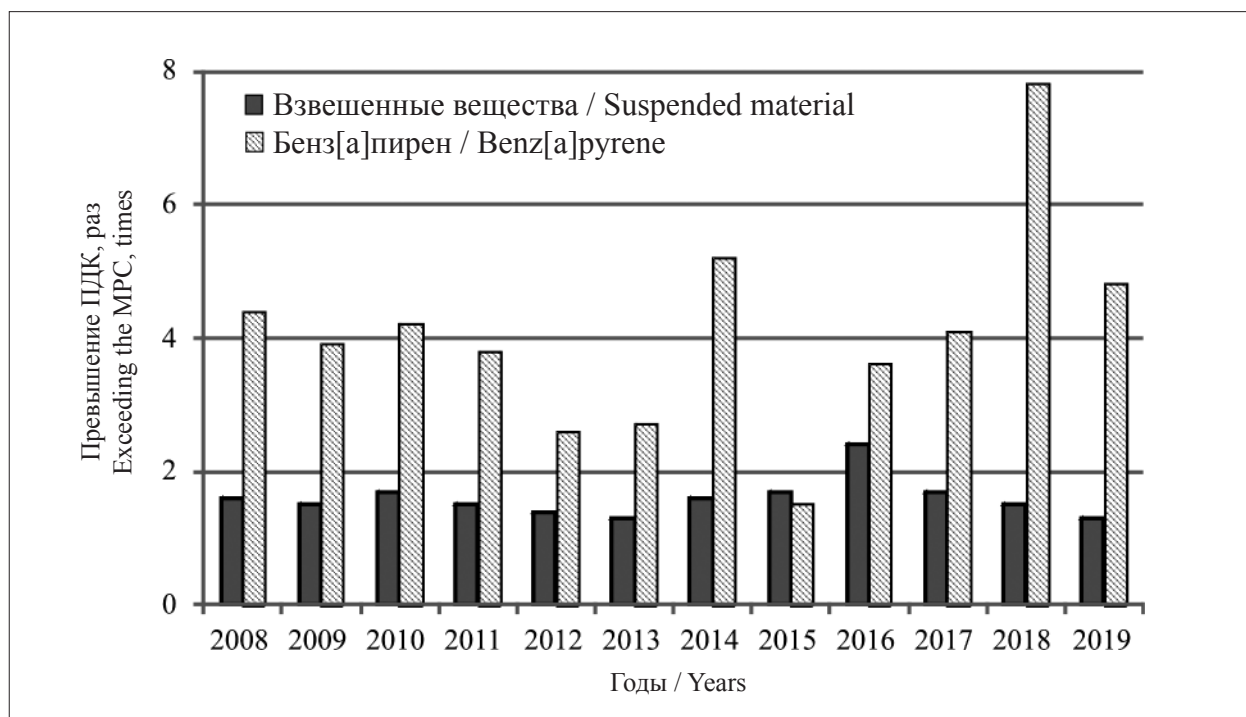


Рис. 1. Загрязнение атмосферы города по веществам, имеющим наибольшее превышение ПДК
 Fig. 1. Pollution of the city's atmosphere by substances that have the highest excess of MPC

угля, при сжигании которого выделяется множество загрязняющих веществ (бенз[а]-пирен, взвешенные вещества, оксиды серы, азота, углерода и пр.).

Приведённые выше параметры качества атмосферного воздуха в г. Иркутске характеризуют его среднее состояние в целом за год. С учётом сезонных особенностей циркуляции атмосферы и характера подстилающей поверхности наибольшая продолжительность воздействия и интенсивность загрязняющих веществ будет отмечаться при всех прочих равных условиях в местоположениях с застойными явлениями.

Площадь современного города составляет 277,35 км². Она представлена разными типами подстилающей поверхности: водные (2870 га), застроенные (14255 га), луга и поймы рек (4260 га), леса и парки (6350 га). При этом большую часть занимают разные виды застройки (каменные, кирпичные, деревянные), асфальтобетонные дороги и площадки [12]. При возведении современных микрорайонов произошло существенное замещение лесопокрываемых площадей и деревянных застроек каменными. По влиянию на температурный режим города преобладающими типами подстилающей поверхности являются водные объекты, каменная застройка, деревянная застройка, лесопарковая зона (рис. 2, см. цветную вкладку). Поскольку луга и поймы в черте города часто заняты дачными участками, половина от их общей площади (2130 га) отнесена к застройкам. Другая половина учтена в незастроенной парковой зоне.

Сопряжённый анализ данных [10, 11] показал, что микроклиматические различия города, обусловленные совокупностью факторов среды, могут способствовать различному воздействию на состояние атмосферы (рис. 2, см. цветную вкладку). На карте показана качественная оценка степени влияния, в результате которой формируются пространственные различия экологического состояния атмосферы в г. Иркутске.

Наиболее сильное воздействие проявляется в обширной зоне застойных явлений, к которым относятся пониженные формы рельефа и где можно различить три типа микроклимата низин. Первый тип включает местоположения вокруг незамерзающей части Ангары, с отклонениями температур до 1,9 °С; второй тип присущ центральной части города, с отклонениями температур до -1,5 °С; третий тип, наибольший по площади, охватывает долины рек Иркут, Ангары, Ушаковки, Каи с прито-

ками. Здесь возможны отклонения температур до -3,6 °С. Большой разброс в отклонениях связан с обогревающим влиянием Ангары и инфраструктурными особенностями города, а также наименьшим вкладом лесопокрываемых территорий.

Наиболее сильное воздействие может поддерживать формирование интенсивного загрязнения атмосферы жилых и рекреационных территорий. В первом типе микроклимата это чаще всего связано с повышенной влажностью над незамерзающей поверхностью реки ниже плотины Иркутской ГЭС, что приводит к образованию смога. В третьем – сток и накопление холодного воздуха в днищах долин препятствует выносу загрязняющих веществ за его пределы. Второму типу присущи основные черты двух названных выше, которые усугубляются характером подстилающей поверхности с преимущественной многоэтажной каменной застройкой и положением относительно основного потока воздушных масс.

Поверхности вершин склонов из-за большей активности воздухообмена менее подвержены застойным явлениям. Температура воздуха здесь существенно выше, чем в днищах долин. Её отклонения составляют около -1 °С. В северо-восточной части города процесс формирования качества воздуха на вершинных поверхностях происходит под слабым воздействием факторов среды (рис. 2, см. цв. вкладку).

Совокупное умеренное воздействие факторов среды на состояние атмосферного воздуха склоновых и выровненных территорий зависит от локальных особенностей и типов застройки. Вклад характера подстилающей поверхности существенно различается и обусловлен условиями теплообмена. На склонах и приподнятых возвышенных участках в центре города отклонения температуры воздуха от базовой метеостанции «Иркутск, обсерватория» не превышают ±0,5 °С, на его окраинах – -2,0 °С.

Преимущественное влияние каменных застроек и дорог на температуру воздуха наиболее заметно сказывается в центре города на правом берегу Ангары, на левом – оно сглажено влиянием лесопокрываемых площадей. С удалением от центра города сходные температуры воздуха присущи склонам разной крутизны и экспозиции, что происходит в результате существенных расхождений теплообмена в преобладающих типах подстилающей поверхности.

В структуре типов подстилающей поверхности леса и парки занимают наименьшую

**Е. В. Максютова, Л. Б. Башалханова,
Л. М. Корытный, А. А. Сороковой
«Природно-климатические факторы
в экологическом зонировании г. Иркутска». С. 55.**

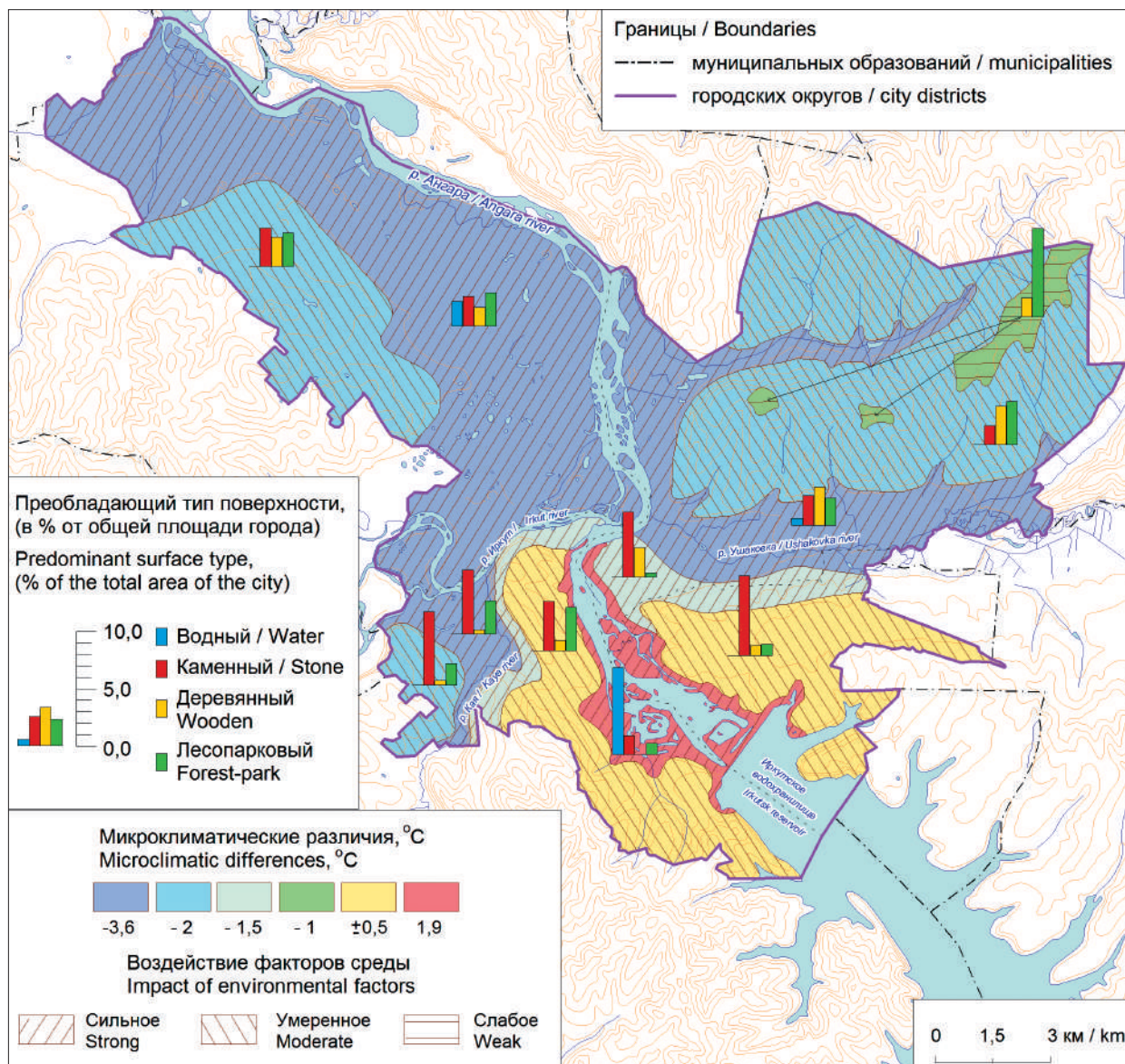


Рис. 2. Экологическое зонирование городской среды Иркутска по природно-климатическим факторам
Fig. 2. Ecological zoning of the urban environment of Irkutsk by natural and climatic factors

площадь, особенно в зоне сильного воздействия. В мировой практике признана необходимость увеличения площади лесопарковых зон для улучшения качества жизни населения урбанизированных территорий [13, 14]. В некоторых городах России доля особо охраняемых природных территорий достигает 13,6% (г. Пермь) и даже 17% (г. Екатеринбург) от их общей площади [15]. В г. Иркутске площадь таких территорий составляет 1,8% от площади города и 7,8% от площади городских лесов, которые находятся под постоянной угрозой замещения. Их важно переводить в категорию охраняемых природных территорий.

Заключение

Формирование экологического состояния атмосферного воздуха в г. Иркутске связано с превышением содержания опасных загрязняющих веществ и тенденцией роста концентрации по взвешенным веществам и бенз[а]пирену. Микроклиматические различия города, обусловленные совокупностью факторов среды (характером рельефа и подстилающей поверхности – водная, застройка каменная, деревянная, лесопарковая), могут способствовать различному воздействию на состояние атмосферы. Застойные явления в зоне сильного влияния могут поддерживать формирование интенсивного загрязнения атмосферного воздуха жилых и рекреационных территорий.

Результаты полученного зонирования могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий и для улучшения условий проживания населения. Представляется необходимым региону, добывающему и транспортирующему природный газ за свои пределы, диверсифицировать топливный баланс предприятий ТЭЖ в пользу газа.

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А21-121012190055-7, АААА-А21-121012190059-5, АААА-А21-121012190018-2) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-44020 Монг_т.

References

1. Bezuglaya E.Y. Air quality in the Russian Federation // WMO Bulletin. 1996. V. 45. No. 2. P. 132–135.

2. Geosystems of the Western Sayan foothills. Novosibirsk: Nauka, 1979. 319 p. (in Russian).

3. Kochurov B.I., Ivashkina I.V., Fomina N.V., Ermakova Yu.I. Urban health approach to the study and development of large cities // Geography and Natural Resources. 2020. V. 41. No. 3. P. 203–210. doi: 10.1134/S1875372841030014

4. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge University Press, 2017. 582 p.

5. Taha H. Urban climates and heat island: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat // Energy and Buildings. 1997. No. 26. P. 99–103.

6. Korytnyi L.M., Bashalkhanova L.B., Veselova V.N. Atmospheric pollution as a factor of environmental hazard in the Baikal Region Cites // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. V. 44. No. 10. P. 704–711. doi: 10.3103/S1068373919100091

7. Arguchintseva A.V., Godvinskaya I.G., Akhtimankina A.V. Atmospheric air pollution by heat power companies in Irkutsk // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Nauki o Zemle”. 2011. No. 4 (1). P. 33–47 (in Russian).

8. State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018”. Moskva: Minprirody Rossii; NPP “Kadastr”, 2019. 847 p. (in Russian).

9. State report “On the state and environmental protection of the Irkutsk region in 2019”. Irkutsk: Minprirody i Ekologii Irkutskoy Oblasti, 2020. 314 p.; 2019. 307 p.; 2018. 249 p.; 2017. 274 p.; 2016. 160 p.; 2015. 175 p.; 2014. 400 p.; 2013. 337 p.; 2012. 227 p.; 2011. 400 p.; 2010. 585 p.; 2009. 488 p. (in Russian).

10. Climate of the city of Irkutsk / Eds. Ts.A. Shver, N.P. Formanchuk. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 245 p. (in Russian).

11. All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (VNIIGMI-WDC) [Internet resource] <http://www.meteo.ru/data/> (Accessed: 19.02.2020) (in Russian).

12. Atlas of the development of Irkutsk. Irkutsk: Izdvo Instituta Geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2011. 131 p. (in Russian).

13. Forman R.T.T. Urban regions: ecology and planning beyond the city. New York: Cambridge Univ. Press, 2008. 408 p.

14. Trzyna T. Urban protected areas: profiles and best practice guidelines. Best practice protected area guidelines Series No. 22. Gland, Switzerland: IUCN, 2014. 110 p.

15. Debelaya I.D., Morozova G.Yu. Urban specially protected natural territories in the green infrastructure of the city of Khabarovsk // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-203-209

Зообентос дельты реки Северная Двина

© 2021. М. А. Студёнова, специалист, И. И. Студёнов, к. б. н., в. н. с.,
 Д. В. Чупов, специалист, А. С. Самодов, специалист,
 Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института
 рыбного хозяйства и океанографии,
 163002, Россия, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 17,
 e-mail: Studenov@pinro.ru, Studenova@pinro.ru

На 5 основных рукавах и протоках дельты р. Северная Двина с 2012 г. начаты комплексные исследования зообентоса. В 2012–2018 гг. в составе зообентоса было обнаружено 20 таксонов, относящихся к 6 типам и 11 классам беспозвоночных. Среднее значение индекса Шеннона по зообентосу дельты р. Северная Двина составило 1,21, изменяясь от 0,70 до 1,84. Численность беспозвоночных за годы наблюдений варьировала от 640 экз./м² до 16573 экз./м², составив в среднем 5704 экз./м². Основу численности формировали малощетинковые черви, личинки комаров-звонцов. Биомасса беспозвоночных в дельте р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала от 0,29 до 25,3 г/м², составив в среднем по всем станциям за все годы наблюдений 6,21 г/м². Основу биомассы формировали малощетинковые черви, их доля в формировании общей биомассы достигала 94,6%. Определён средний олигохетный индекс, который по всем районам за период наблюдений составил 57,8%. По значениям олигохетного индекса дельта р. Северная Двина классифицируется как умеренно загрязнённая.

Ключевые слова: Северная Двина, зообентос, состав, численность, биомасса.

Zoobenthos of the Severnaya Dvina River delta

© 2021. M. A. Studenova ORCID: 0000-0001-5778-490X, I. I. Studenov ORCID: 0000-0002-0826-2537,
 D. V. Chupov ORCID: 0000-0001-6196-5744, A. S. Samodov ORCID: 0000-0002-6921-9946,
 Polar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography,
 17, Uritskogo St., Arkhangelsk, Russia, 163002,
 e-mail: Studenov@pinro.ru, Studenova@pinro.ru

Systematic studies of zoobenthos at the delta of the Severnaya Dvina river begun in 2012. This study contains the most complete information about the taxonomic composition of zoobenthos of the area, the number and frequency of taxons, the number and biomass of each of the taxa. Twenty taxons belonging to 6 types and 11 classes of invertebrates were found in zoobenthos during the whole period of research (2012–2018). The average number of taxons per 1 station during the entire research period was 9, ranging from 5 in the Korabel'ny arm to 16 in the Murmansk arm. Oligochaetes, bivalvia, and chironomidae larvae were found in samples at all stations each year. Isopoda, stoneflies larvae and beetle larvae were found with lowest occurrence rate. Average value of Shannon's zoobenthos index at the delta of the Severnaya Dvina river was 1.21, varying from 0.70 (Maimaxa and Kuznechikha branches) to 1.84 (Murmansk arm). The number of invertebrates over the years varied very widely – from 640 spec./m² (Korabel'ny arm, 2018) up to 16573 spec./m² (Murmansk arm, 2014), averaging 5704 spec./m². Oligochaetes and chironomidae larvae were the most numerous. The biomass of invertebrates at the delta of the Severnaya Dvina river varied very widely – from 0.29 g/m² (Korabel'ny arm, 2017) to 25.3 g/m² (Murmansk arm, 2014), averaging 6207 mg/m² for all observation years. The base of biomass was formed by Oligochaetes, their participation in the formation of total biomass reached 94.6%. An average oligochet index was 57.8%. The water condition of the delta of the Severnaya Dvina river was classified as moderately contaminated, according to the values of the oligochet index.

Keywords: Severnaya Dvina River, zoobenthos, taxonomic composition, number, biomass.

Первые сведения о донных беспозвоночных устьевой части р. Северная Двина, в частности – моллюсках опубликованы в 1927 г. [1]. Затем до 60-х годов XX века исследования донной фауны реки не проводили. Основной задачей изучения состава донных биоценозов

в 1960–1980-х гг. являлась оценка влияния деятельности промышленных предприятий, прежде всего – целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), на экосистему р. Северная Двина [2–4]. Кроме того, проводили поиск индикаторных видов зообентоса [5, 6], ис-

следовали отдельные таксоны зообентоса, включая инвазийные [7, 8].

Систематические исследования зообентоса дельты р. Северная Двина были начаты в 2012 г. Отделом Северный (СевПИНРО) Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО». Целью работы было получение наиболее полных сведений о таксономическом составе зообентоса, количестве и частоте встречаемости таксонов по разным участкам дельты, численности и биомассе каждого из таксонов. В задачи исследований входило также определение олигохетного индекса Гуднайта-Уитлея, дающего представление об уровне загрязнённости дельты р. Северная Двина. Актуальность работы заключается в представлении обобщённых результатов первых комплексных исследований, дающих наиболее полное представление о составе зообентоса дельты р. Северная Двина, его численности и биомассе, а также о распределении этих показателей по основным рукавам и протокам дельты в 2012–2018 гг.

Объекты и методы исследований

Река Северная Двина образуется от слияния рек Сухона и Юг, впадает в Двинскую губу Белого моря. Общая протяжённость р. Северная Двина – 744 км [9]. Площадь водосбора – 357000 км², речная сеть развита очень сильно – в её состав входит 61878 рек и ручьёв, средняя густота речной сети по бассейну составляет 0,58 км/км² [10]. При впадении в Двинскую губу образует обширную дельту, состоящую из более чем 150 проток [11]. Ширина нижней оконечности дельты достигает 45 км, глубина врезания в материк – 37 км. Площадь дельты составляет 900 км², на долю суши приходится около 55% общей площади. Дельта реки возникла в условиях отчётливо выраженных приливно-отливных течений, обычно препятствующих отложению наносов в устье. В дельте р. Северная Двина разделяется на 3 основных рукава – Никольский (около 32% годового стока); Корабельный (21%), Мурманский (18%) и 2 протоки – Маймакса (18%) и Кузнечиха (6%).

По количеству основных рукавов и проток дельты р. Северная Двина для сбора материалов были определены 5 станций, на которых ежегодно, в один и тот же период (сентябрь–октябрь) выполнялся сбор проб. Сбор бентосных проб на каждой станции выполняли в 3-кратной повторности – у левого берега, у правого берега и в точке с наибольшей глубиной. Пробы отбирали дночерпателем Петер-

сена с площадью захвата 0,025 м². Первичную промывку осуществляли в сачках из газ-сита № 23 [12]. После первичной промывки пробы фиксировали 4% раствором формалина, этикетировали и затем обрабатывали в камеральных условиях согласно общепринятым методам [13]. Всего за период наблюдений собрано и обработано 105 проб зообентоса. Определяли систематическую принадлежность организмов зообентоса с помощью общепринятых определителей [14, 15].

Результаты и обсуждение

В составе зообентоса за весь период исследований (2012–2018 гг.) было обнаружено 20 таксонов: Acari (водяные клещи); Amphipoda (бокоплавы); Ostracoda (ракушковые ракообразные); Isopoda (равноногие раки); Collembola (ногохвостки); Plecoptera (веснянки); Ephemeroptera (подёнки); Coleoptera (жуки); Trichoptera (ручейники); Diptera (двукрылые); Caratopogonidae (мокрецы); Chironomidae (звонцы); Hirudinea (пиявки); Oligochaeta (малощетинковые чер-

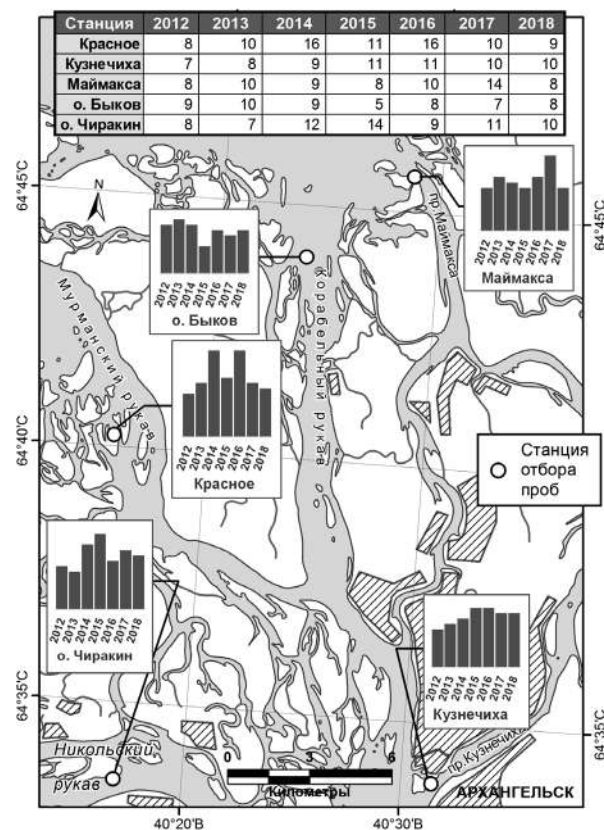


Рис. 1. Количество таксонов зообентоса на различных станциях отбора проб в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг.
 Fig. 1. The zoobenthos taxa number at sampling stations in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018

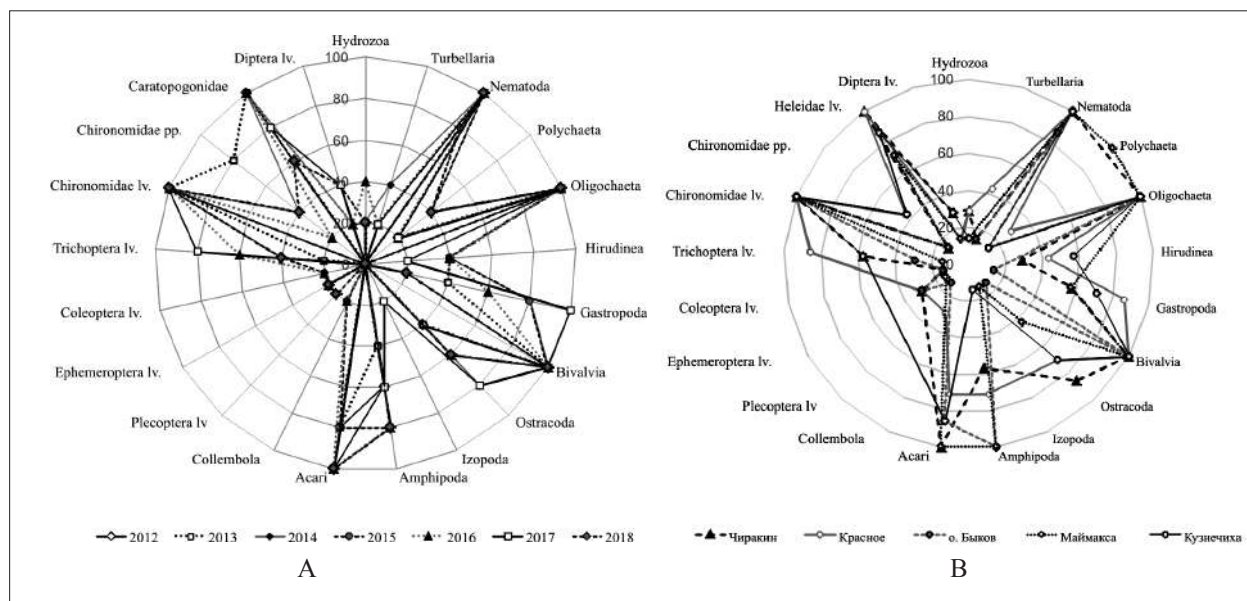


Рис. 2. Частота встречаемости различных таксонов беспозвоночных в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг. по годам (А) и по станциям (В)
Fig. 2. The different taxa of invertebrates frequency of occurrence in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018 by years (А) and by stations (В)

ви); Polychaeta (многощетинковые черви); Nematoda (круглые черви); Gastropoda (брюхоногие моллюски); Bivalvia (двустворчатые моллюски); Hydra (гидра); Turbellaria (ресничные черви).

Среднее количество таксонов на 1 станцию за весь период исследований составило 9, варьируя от 5 в Корабельном рукаве (о. Быков) до 16 в Мурманском рукаве (район д. Красное) (рис. 1).

Количество таксонов по станциям в разные годы варьировало в основном в незначительных пределах, лишь в Мурманском рукаве (район д. Красное) изменялось вдвое – от 8 в 2012 г. до 16 в 2014 и 2016 гг.

Частота встречаемости различных таксонов в целом по дельте р. Северная Двина в разные годы представлена на рисунке 2А. Ежегодно на всех станциях в пробах встречались малощетинковые черви (Oligochaeta), двустворчатые моллюски (Bivalvia) и личинки комаров-звонцов (Chironomidae). В отдельные годы во всех рукавах и протоках были отмечены водяные клещи и личинки мокрецов. При этом по разным станциям частота встречаемости различных таксонов значительно изменялась (рис. 2В). Наибольшее количество постоянно встречающихся таксонов – 7 отмечено в протоке Маймакса, что свидетельствует о стабильности состава зообентоса. В Никольском рукаве ежегодно встречалось 6 групп организмов. В Мурманском рукаве ежегодно встречалось 5 таксонов – тех же, что и в Никольском рука-

ве, за исключением водяных клещей. В Корабельном рукаве и протоке Кузнечиха ежегодно встречалось по 4 таксона – по 3 общих для всех рукавов, в Корабельном рукаве ежегодно встречались бокоплавы, в протоке Кузнечиха – круглые черви. Наименьшая частота встречаемости (14%) обнаружена для равноногих раков, встреченных только в 2017 г. в протоке Маймакса, личинок веснянок (Корабельный рукав, 2018 г.) и личинок жуков (Никольский рукав, 2015 г. и Корабельный рукав, 2016 г.). Встречаемость остальных таксонов варьировала в разные годы на разных станциях от 21,5 до 97,2%.

В целом по дельте за период 2012–2018 гг. среднее значение индекса Шеннона [15] составило 1,21, изменяясь от 0,70 (протоки Кузнечиха и Маймакса) до 1,84 (Мурманский рукав) (рис. 3). Максимальная стабильность индекса Шеннона отмечена в Корабельном рукаве – здесь его значения изменялись от 1,13 до 1,54. Во всех остальных рукавах и протоках значение индекса Шеннона за период наблюдений изменялось более чем в 2 раза.

Численность беспозвоночных в дельте р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала в очень широких пределах – от 640 экз./м² (Корабельный рукав, 2018 г.) (рис. 4) до 16573 экз./м² (Мурманский рукав, 2014 г.), составив в среднем 5704 экз./м².

В Корабельном рукаве за весь период наблюдений численность беспозвоночных, варьировавшая от 640 экз./м² до 3240 экз./м²,

была наименьшей по дельте р. Северная Двина. Наибольшие значения численности беспозвоночных отмечены в Мурманском и Никольском рукавах – 16573 экз./м² и 13733 экз./м² соответственно. При этом варьирование диапазона значений численности также было самым высоким в этих рукавах – минимальные значения составили соответственно 1147 и 2120 экз./м². Наиболее стабильная численность отмечена в протоке Кузнечиха – минимальное значение отмечено в 2013 г. (4027 экз./м²), максимальное – в 2014 г. (9547 экз./м²).

Основу численности в дельте р. Северная Двина формировали малоцетинковые черви и личинки комаров-звонцов. Эпизодически относительно высокий вклад в формирование численности вносили бокоплавцы: в Корабельном рукаве в 2016 г. их доля от общей численности составляла 27,2%, в протоке Маймакса в 2018 г. – 34,3%, при этом в остальные годы их доля в формировании численности зообентоса не превышала 8,6%.

Несмотря на существенное снижение нагрузки на экосистему реки за счёт значи-

тельного снижения интенсивности речного судоходства, объёмов сплава древесины, дноуглубления, промышленных сбросов в основном с целлюлозно-бумажных комбинатов, доминирующим группами в составе зообентоса остаются олигохеты. Малоцетинковые черви формировали основу численности в 60-х гг. XX века, на разных участках реки их доля от общей численности составляла от 37 до 93% [2]. В 80-х годах XX века также сохранялась доминирующая роль олигохет в формировании численности зообентоса, в частности, в протоке Кузнечиха [3]. В целом по сравнению с 60-х и 80-х годами XX века существенных изменений в составе зообентоса не отмечено.

Биомасса беспозвоночных в дельте р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала в очень широких пределах – от 0,29 (Корабельный рукав, 2017 г.) до 25,3 г/м² (Мурманский рукав, 2014 г.) (рис. 5), составив в среднем по всем станциям за все годы наблюдений 6,21 г/м².

В Корабельном рукаве за весь период наблюдений биомасса беспозвоночных, варьир-

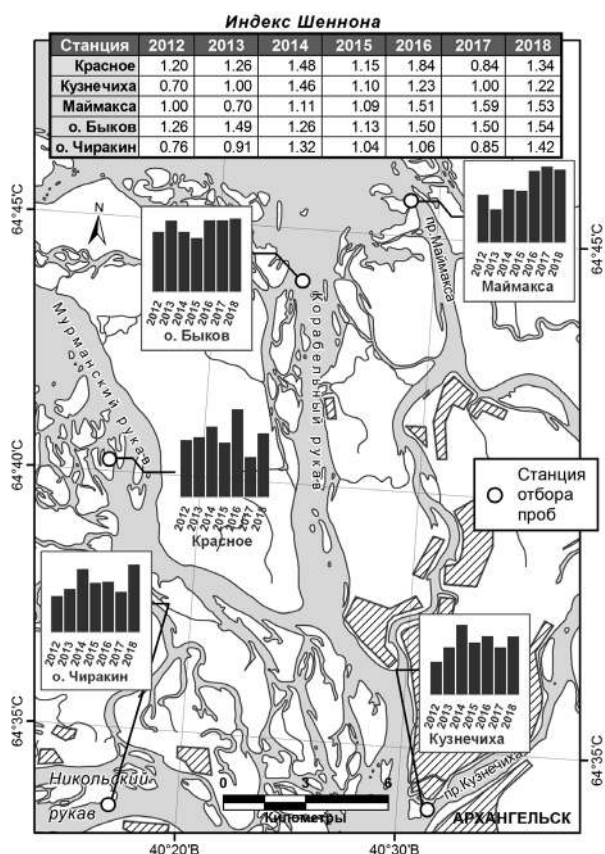


Рис. 3. Значения индекса Шеннона в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг. по станциям отбора проб
Fig. 3. The Shannon index rates in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018

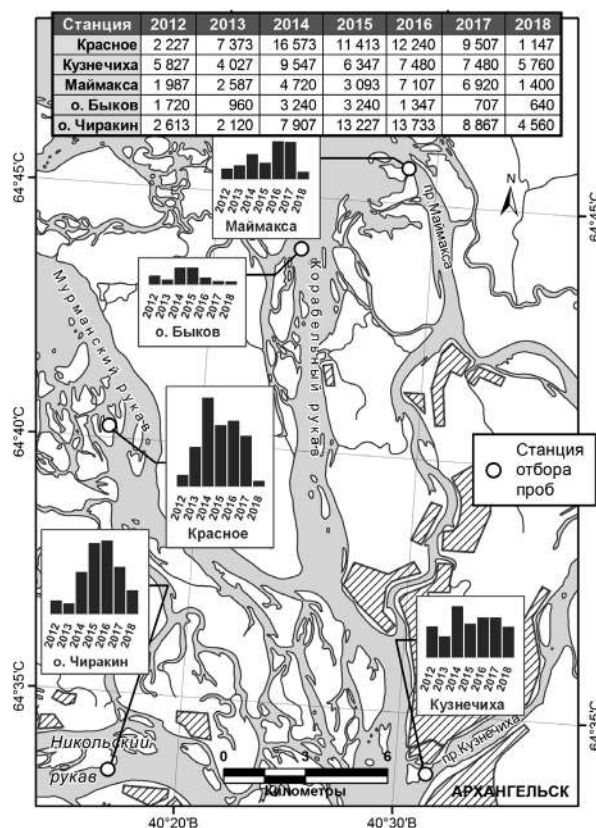


Рис. 4. Численность организмов зообентоса по станциям в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг.
Fig. 4. The number of zoobenthos organisms in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018

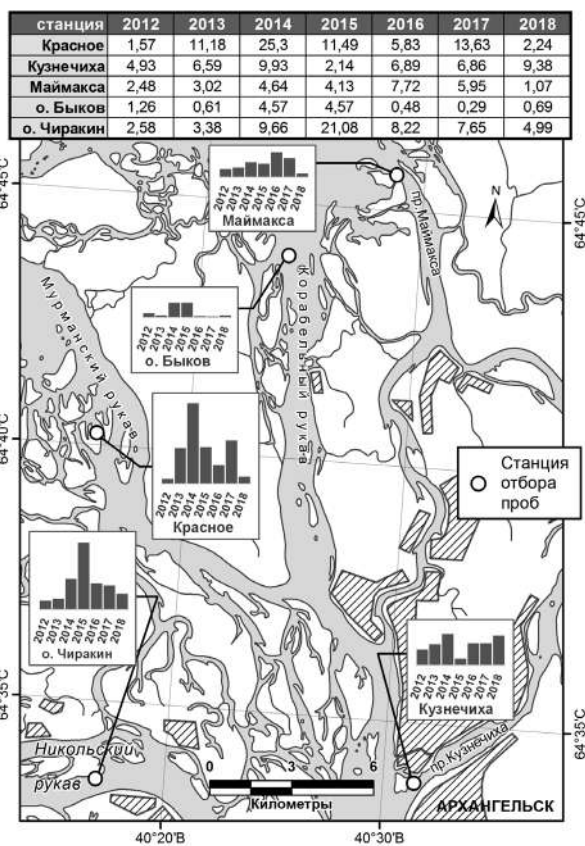


Рис. 5. Биомасса зообентоса по станциям в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг.
Fig. 5. The biomass of the zoobenthos in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018

ровавшая от 0,29 до 4,57 г/м², и составившая в среднем 1,78 г/м² была наименьшей по дельте р. Северная Двина. Максимальные значения биомассы зообентоса отмечены в Мурманском рукаве: средняя за период наблюдений 10,18 г/м², минимальная – 1,57 г/м² (2012 г.), максимальная – 25,3 г/м² (2014 г.). Наиболее стабильная биомасса, как и численность, отмечена в протоке Кузнечиха – минимальное значение отмечено в 2015 г. (2,14 г/м²), максимальное – в 2014 г. (9,93 г/м²). Основу биомассы во всех рукавах формировали малощетинковые черви. Эпизодически в формировании биомассы зообентоса значительную роль играли двустворчатые моллюски, личинки комаров-звонцов и брюхоногие моллюски.

Учитывая доминирование олигохет в бентосных пробах, для оценки качества воды в дельте р. Северная Двина был применён олигохетный индекс (ОИ). Классический вариант ОИ впервые был предложен Гуднайтом и Уитли в 1961 г. [16,17]. Данный индекс значительно варьировал как по годам наблюдений,

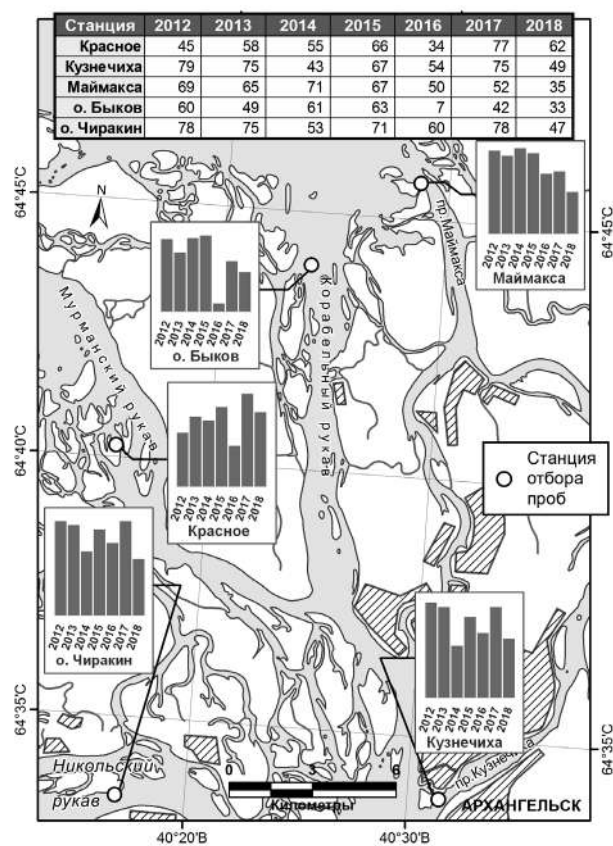


Рис. 6. Олигохетный индекс Гуднайта-Уитли (%) по станциям в дельте р. Северная Двина в 2012–2018 гг.
Fig. 6. Goodnight and Whitley oligochaeta index (%) in the delta of the Severnaya Dvina river in 2012–2018

так и по рукавам и протокам дельты р. Северная Двина (рис. 6).

Наиболее загрязнённым оказался Никольский рукав, по которому проходит около трети стока р. Северная Двина и средний ОИ в котором за период наблюдений составил 66%. В целом по значениям ОИ дельта р. Северная Двина умеренно загрязнена, средний ОИ по всем районам за период наблюдений составил 57,8%. Наименее загрязнённым оказался Корабельный рукав, на котором отсутствуют промышленные предприятия и судоходство.

Результаты исследований были включены в базу данных «Зообентос пресноводных водных объектов Севера России» [18].

Заклучение

Систематические исследования зообентоса дельты р. Северная Двина, начатые в 2012 г., позволили впервые получить наиболее полные сведения о таксономическом составе зообентоса, количестве и частоте встречае-

мости таксонов по разным участкам дельты, численности и биомассе каждого из таксонов. В составе зообентоса за весь период исследований (2012–2018 гг.) было обнаружено 20 таксонов, относящихся к 6 типам и 11 классам беспозвоночных. Среднее количество таксонов на 1 станцию за весь период исследований составило 9, варьируя от 5 в Корабельном рукаве до 16 в Мурманском рукаве. Ежегодно на всех станциях в пробах встречались малощетинковые черви (*Oligochaeta*), двустворчатые моллюски (*Bivalvia*) и личинки комаров-звонцов (*Chironomidae*), которые доминировали по частоте встречаемости. Наименьшая частота встречаемости обнаружена для равноногих раков, личинок веснянок и личинок жуков. Среднее значение индекса Шеннона по зообентосу дельты р. Северная Двина составило 1,21, изменяясь от 0,70 (протоки Кузнечиха и Маймакса) до 1,84 (Мурманский рукав). Численность беспозвоночных за годы наблюдений варьировала в очень широких пределах – от 640 (Корабельный рукав, 2018 г.) до 16573 экз./м² (Мурманский рукав, 2014 г.), составив в среднем 5704 экз./м². Основу численности формировали малощетинковые черви, личинки комаров-звонцов. Биомасса беспозвоночных в дельте р. Северная Двина за годы наблюдений варьировала в очень широких пределах – от 0,29 Корабельный рукав, 2017 г.) до 25,3 г/м² (Мурманский рукав, 2014 г.), составив в среднем по всем станциям за все годы наблюдений 6,21 г/м². Основу биомассы формировали малощетинковые черви, их доля в формировании общей биомассы достигала 94,6%. Определён средний олигохетный индекс, который по всем районам за период наблюдений составил 57,8%. По значениям олигохетного индекса дельта р. Северная Двина классифицируется как умеренно загрязнённая.

Работа выполнена в рамках государственного мониторинга водных биоресурсов и среды их обитания.

Авторы благодарят инженера Отдела Северный (СевПИПРО), Полярного филиала ФГБНУ «ВНИРО» А. Л. Левицкого за помощь в подготовке рисунков.

References

1. Velichkovsky V.A. Mollusks of the vicinity of Arkhangelsk // Trudy Gosudarstvennogo polyarnogo khimiko-bakteriologicheskogo instituta. V. II. Arkhangelsk. 1927. P. 147–151 (in Russian).

2. Sokolova V.A. The benthos biocenoses of the mouth section of the Severnaya Dvina river // Water resources of Karelia and ways of their use. Petrozavodsk: Karelia, 1970. P. 136–146 (in Russian).

3. Semernoy V.P., Voropaeva O.G., Verhovtseva N.V., Verina O.V., Ereimeyshivili A.V. Organization and results of hydrobiological monitoring at the mouth of the Severnaya Dvina river // Problems of nature protection: Tezisy dokladov Vsesoyuznoi konferentsii. Baykalsk, 1984. P. 29–30 (in Russian).

4. Semernoy V.P. The benthos of the contaminated section of the Severnaya Dvina river situated near the mouth of a river // Actual problems of biology, ecology, chemistry and environmental education: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 40-letiyu fakulteta biologii i ekologii Yaroslavskogo gosudarstvennogo universitetata im. P.G. Demidova. Yaroslavl', 2011. P. 137–142 (in Russian).

5. Popchenko V.I. To the knowledge of fauna of oligochaete of the Severnaya Dvina river // Hydrobiological Journal. 1969. V. 5. No. 5. P. 92–96 (in Russian).

6. Semernoy V.P. About the indicator value of *Aulophorus furkatus* (Müller) (Oligochaeta, Naididae) // Environmental problems of Pribaikalye: Tezisy dokladov vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii. Irkutsk, 1982. P. 55 (in Russian).

7. Popchenko V.I. Genesis of fauna of oligochaete of Northern Europe // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 1999. No. 1. P. 128–133 (in Russian).

8. Makhnovich N.M. Characterization of *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) population in the mouth part of the Severnaya Dvina river // Problems of regional ecology. 2018. No. 2. P. 68–72 (in Russian).

9. Hydrological study. Surface water resources of the USSR. Northern region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. V. 3. 612 p. (in Russian).

10. Surface water resources of the USSR: Hydrological study / Eds. I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. V. 3. Northern region. 664 p. (in Russian).

11. Hydrology of the mouth section of the Severnaya Dvina river. Moskva: Gidrometeoizdat, 1965. 376 p. (in Russian).

12. Method of studying biogeocenoses of internal water bodies. Moskva: Nauka, 1975. P. 158–216 (in Russian).

13. Shubina V.N. The stoneflies larvae in the rivers of the national park “Yugyd va” (Komi Republic) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 2. P. 46–54 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-2-046-054

14. Identification guide of fauna and flora of the northern seas of the USSR / Ed. N.S. Gaevskaya. Moskva: Sovetskaya nauka, 1948. 740 p. (in Russian).

15. Identification guide of freshwater invertebrates of the European part of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 512 p. (in Russian).

16. Alimov A.F. Elements of the theory of the functioning of aquatic ecosystems. Sankt-Peterburg: Nauka, 2000. 147 p. (in Russian).

17. Goodnight C.J., Whitley L.S. Oligochaetes as indicators of pollution // Proc. 15th Int. Waste Conf., 1961. V. 106. P. 139–142.

18. Zoobenthos of freshwater water bodies of the North of Russia. Database, certificate number: RU 2017620660.

Экологическое состояние побережья Малого Моря и его влияние на загрязнение озера Байкал

© 2021. И. А. Белозерцева, к. г. н., зав. лабораторией,
И. Б. Воробьева, к. г. н., с. н. с., Н. В. Власова, к. г. н., с. н. с.,
Д. Н. Лопатина, к. г. н., н. с., М. С. Янчук, м. н. с.,
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 1,
e-mail: belozia@mail.ru

В 2016–2018 гг. проведены комплексные ландшафтно-географические исследования на побережье Малого Моря (пролив между островом Ольхон и западным берегом Байкала) с отбором проб снега, почв и поверхностных вод. Выявлено локальное загрязнение снега около населённых пунктов и турбаз побережья оз. Байкал. Содержание ионов аммония, фосфатов и нефтепродуктов в снеге побережья озера превышает ПДК. Источниками локального загрязнения снега тяжёлыми металлами (ТМ) прибрежной зоны озера являются автотранспорт и печное отопление населённых пунктов и турбаз, а также терригенная пыль почв и пород побережья. Санитарно-гигиеническое состояние воды самого оз. Байкал удовлетворительное благодаря тому, что загрязняющие вещества аккумулируются в почвах побережья, и происходит разбавление их концентрации огромным количеством воды озера. Зафиксировано загрязнение прибрежных вод Малого Моря и р. Сарма и Анга в рекреационной зоне. В прибрежных водах Малого Моря обнаружены высокие концентрации ионов аммония, фосфатов и свинца, превышающие ПДК вблизи населённых пунктов Сарма и Култура. В водах рек Сарма и Анга выявлены высокие концентрации свинца и фосфатов. Изучены некоторые экологические и физико-химические свойства почв восточного Приольхонья на территории самого посещаемого туристами западного побережья оз. Байкал. Почвы исследуемой территории в основном маломощные сильно- и среднекаменистые, лёгкого гранулометрического состава с высоким содержанием гумуса, преимущественно с нейтральной и слабощелочной реакцией. Установлены высокие концентрации некоторых ТМ в почвах рекреационной зоны побережья. Кроме антропогенного имеется природный источник загрязнения – почвообразующие породы. В Приольхонье находятся месторождения меди и железа. Современное экологическое состояние почв побережья характеризуется средним уровнем загрязнения. Геохимическими барьерами являются органогенный и щелочной. Однако вследствие лёгкого гранулометрического состава почв может происходить загрязнение вод береговой зоны озера.

Ключевые слова: почвы, снег, вода, загрязнение, рекреация, Малое Море, озеро Байкал.

Ecological condition of the coast of the Maloe More strait and its influence on pollution of Lake Baikal

© 2021. I. A. Belozertseva ORCID: 0000-0001-7995-2298
I. B. Vorobyeva ORCID: 0000-0003-1353-7168, N. V. Vlasova ORCID: 0000-0003-4912-308X
D. N. Lopatina ORCID: 0000-0002-2696-0822, M. S. Yanchuk ORCID: 0000-0003-4970-2655
V. B. Sochava Institute of Geografy SB RAS,
1, Ulanbatorskaya St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: belozia@mail.ru

In 2016–2018 complex physiographic research with sampling of snow, soils and a surface water have been conducted at the coast of Maloe More – the strait between the western shore of Lake Baikal and Olkhon Island (literal meaning of strait name in Russian is Small Sea). Local pollution of snow and atmospheric air near settlements and camp sites of the coast of Lake Baikal is revealed. Content of ammonium, phosphates and oil products in snow exceed maximum allowable concentration. Pollution of coastal waters of the Maloe More strait and the Sarma River in a recreational zone is found. In the coastal waters the high levels of lead, phosphates and ammonium were found, exceeding sanitary standards near the settlements of Sarma and Kulur. High concentrations of lead and phosphates have been identified in the waters of the Sarma and Anga rivers. Ecological, chemical and physical soil properties of meadow and steppe landscapes of Olkhon district in the territory of the west coast of Lake Baikal which is most visited by tourists are studied. The studied soils have mainly small thickness and middle stony profile, light particle size distribution, high content of a humus, mainly neutral and weak alkaline reaction. As a result of the conducted research it is revealed that soils near tourist tracks are polluted by heavy met-

als. The ecological condition of soils at the present stage can be characterized as average degree of a disturbance as a result of recreational activity. Geochemical barriers are organic and alkaline. However, owing to light particle size distribution of soils there can be a pollution of waters of a coastal zone of the lake.

Keywords: soils, snow, water, pollution, recreation, Maloe More Strait, Lake Baikal.

Малое Море – так называют участок озера Байкал, отделённый от основной части островом Ольхон. Геоморфологические особенности территории, сухой климат, относительно тёплая вода Малого Моря из-за его малой глубины образуют специфические природные условия на побережье Байкала, которые в Иркутской области нигде более не наблюдаются. В рекреационном использовании территории исследования преобладает автотуризм в сочетании с палаточным («диким») отдыхом у воды (более 50 тыс. туристов за сезон) [1]. На территориях с высокой рекреационной нагрузкой выявлено уменьшение массы наземной растительности, переуплотнение и ускорение процессов эрозии почв по сравнению с фоновыми участками [2]. Цель исследования – изучение химического состава снега, поверхностных вод и почв на побережье Байкала.

Объекты и методы исследования

В 2015–2018 гг. авторами проведены ландшафтно-геохимические работы в Приольхонье. В зимне-весеннее время года были отобраны пробы снега на побережье, а также акватории Байкала. Параллельно зимой-весной, летом и осенью взяты образцы проб воды озера и рек. В летний период отобраны образцы почв побережья (рис. 1). Всего отобрано более 400 образцов снега, вод и почв на более чем 50 площадках. Отбор проб осуществляли на ключевых участках с учётом источников и направления миграции загрязняющих веществ. В таблицах приведены данные основных ключевых площадок: № 221 – п. Сарма, побережье; № 223 – оз. Байкал, п. Сарма; № 298 – турбазы, оз. Байкал; № 299 – Хагдан-Далай, турбазы; № 302 – Малое Море, побережье; № 303 – Малое Море, турбазы; № 304 – Малое Море, турбазы, оз. Байкал; № 307 – оз. Байкал, устье р. Шида; № 308 – р. Шида (зал. Мухор); № 310 – пролив Ольхонские ворота, паромная переправа, турбазы; № 315 – за о. Ольхон, оз. Байкал. На рисунке 1 отмечены основные ключевые участки с фотографиями ландшафтов и почв (номера площадок на рисунке 1 соответствуют номерам в таблицах).

Анализы проведены в полевых и лабораторных условиях в ИГ СО РАН по стандар-

тизованным методикам [3, 4]. Пробы воды из рек отбирали более чем в 5–10 м от берега с глубины 1 м, прибрежные воды оз. Байкал – до 10 м от берега с глубины 50 см. Пробы почв отбирали на основных элементах рельефа территории исследуемых устьев рек и на различном удалении от источников загрязнения. Почвенные образцы отобраны со всех горизонтов на глубину почвенного профиля.

Водородный показатель, содержание фторидов, хлоридов, гидрокарбонатов, фосфатов, ионов аммония, нитритов, взвешенных веществ в воде оз. Байкал и реках определяли в полевых условиях с помощью полевой комплексной химической лаборатории с дополнительным оборудованием (рН-метр, фотоколориметр и др.) в день отбора проб по стандартным общепринятым методикам. Содержание гидрокарбонатов в воде определяли титрометрическим методом, нитритов – фотометрическим методом с реактивом Грисса, хлоридов – аргентометрическим методом, нитратов – фотометрическим методом с салициловой кислотой, ионов аммония – фотометрическим методом с реактивом Несслера, фосфатов – фотометрическим методом с аскорбиновой кислотой. Содержание фторид-ионов измеряли фотометрическим методом с лантан-ализаринкомплексом.

Образцы снега отбирали снегомером ВС-43 по всей толще снежного покрова. Снег хранили и транспортировали в замороженном виде. В лабораторных условиях при комнатной температуре производили таяние снега, разделяли его на жидкую и твёрдую фазы. Твёрдую фазу снега (взвешенное вещество или твёрдый остаток на фильтре, пыль) отделяли и собирали на фильтре, его содержание определяли весовым методом. Величину рН, содержание F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , взвешенных веществ в снеговой воде определяли по стандартным вышеперечисленным методикам. Валовое содержание макро- и микроэлементов в снеговой воде и почве определено атомно-эмиссионным спектральным методом (Optima 2000 DV). Концентрацию нефтепродуктов устанавливали на флуориметре «Флюорат». Сравнение концентраций химических элементов в снеговой воде проводили с их показателями на фоновой территории, а также с ПДК и ОДК для поверхностных вод,

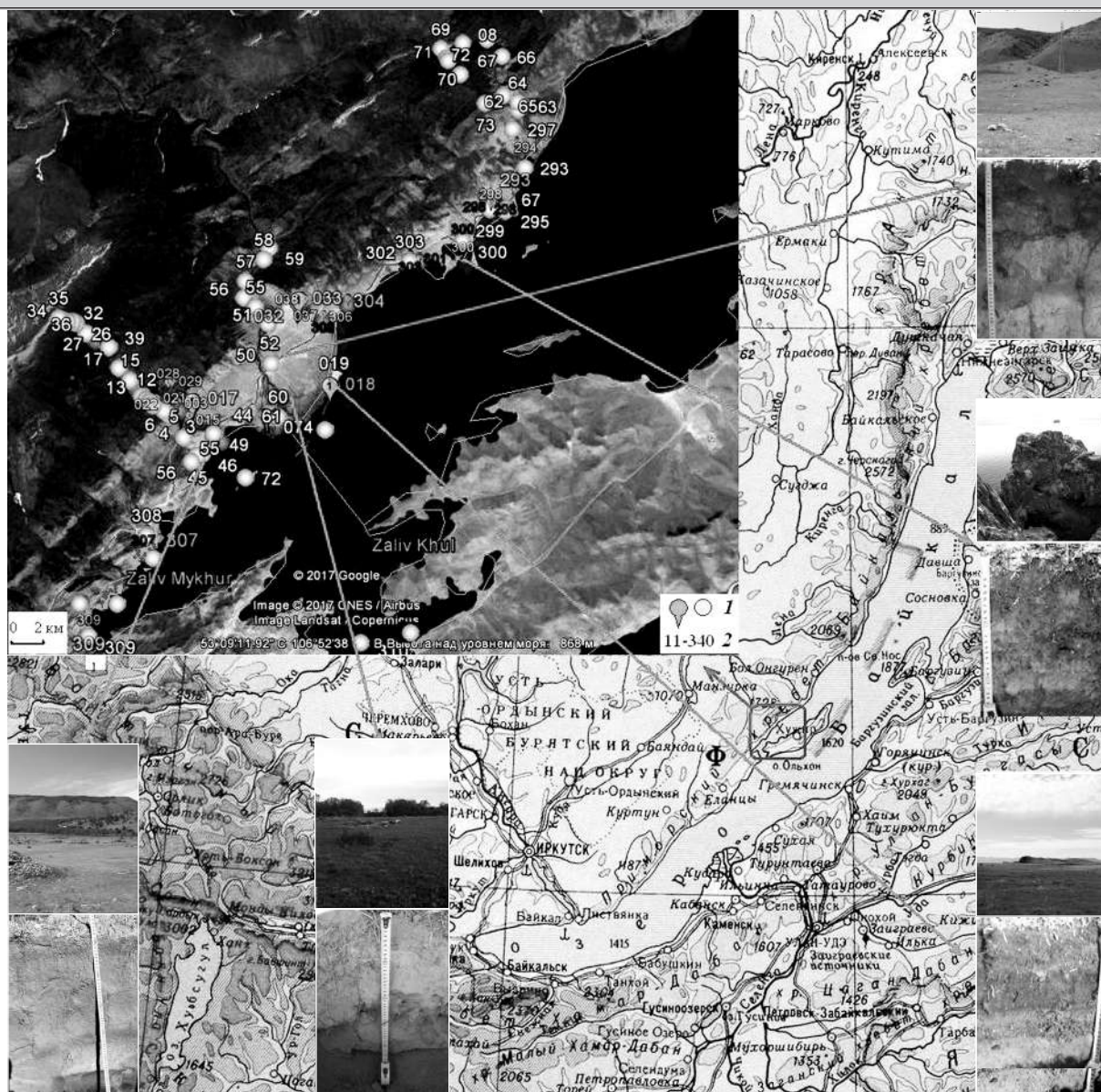


Рис. 1. Территория исследований – восточное Приольхонье: 1 – ключевой участок, 2 – номер площадки
 Fig. 1. The territory of research – East Priolkhonye: 1 – key plot, 2 – point number

так как при таянии талые снеговые воды почти не впитываются в мёрзлую почву и стекают в воды рек и оз. Байкал.

Физико-географические условия. Количество осадков в степях колеблется от 200 до 300 мм в год, в горной тайге – от 350 до 450 мм [1]. В Приольхонье выделяют следующие высотные пояса растительности: от горной тундры до возвышенного плато с горными степями и разреженными остепнёнными лиственничными лесами. На побережье озера имеют распространение гнейсы, мрамора и кристаллические сланцы. Встречаются фрагменты древних глинистых пестроцветных и красноцветных кор выветривания. Имеют широкое распространение серогумусовые почвы. Каштановые и так называемые «каштановые» почвы встречаются в предгорьях сухих степей [1].

В понижениях в более увлажнённых условиях сформировались тёмногумусовые почвы, встречаются чернозёмы. По долинам рек распространены аллювиальные перегнойно-глеевые, торфяно-глеевые, тёмногумусовые и гумусовые почвы. Под лесной растительностью формируются (дерново-)подбуры и (дерново-)подзолы, в присклоновой поверхности встречаются серые почвы.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований выявлено загрязнение снега побережья Малого моря вблизи населённых пунктов и турбаз. Наибольшие коэффициенты концентрации

Таблица 1 / Table 1
 Содержание нефтепродуктов и основных ионов в снеговой воде ключевых участков побережья и акватории оз. Байкал
 The content of oil products and the main ions in snow water at key areas of the coast and water area of Lake Baikal

№ площадки Key area	pH, ед. units	мг/дм ³ mg/dm ³															Susp., г/дм ³ g/dm ³	Σ*, мг/дм ³ mg/dm ³	Petrol., мг/дм ³ mg/dm ³
		F ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺						
221	6,5	0,076	4,27	3,85	12,11	0,015	0	0,005	1,75	0,35	0,23	0,41	0,40	0,086	11,47	0,060			
223	6,5	0,050	4,27	4,20	2,10	0,005	0	0,006	0,39	0,26	0,27	0,19	0,001	0,410	21,74	0,023			
298	6,7	0,088	4,88	3,50	0,11	0,050	0,35	0,001	0,42	0,10	0,14	0,31	0,20	0,256	10,15	0,043			
299	6,7	0,084	6,10	3,68	0,11	0,044	0,25	0,001	0,07	0,11	0,14	0,20	0,15	0,141	10,94	0,069			
302	6,5	0,103	4,27	1,75	23,10	0,050	0,21	0,001	0,84	0,17	0,20	0,19	0,08	0,204	30,96	0,034			
304	6,8	0,097	3,05	3,15	2,75	0,051	0,02	0,001	0,61	0,13	0,16	0,23	0,50	0,003	10,74	0,045			
307	6,2	0,064	3,05	2,63	2,75	0,051	0,01	0,001	0,42	0,10	0,15	0,31	0,01	0,005	9,55	0,039			
308	6,3	0,015	6,71	3,33	2,75	0,039	0,01	0,001	2,30	0,40	0,85	0,45	0,10	0,458	16,96	0,039			
310	6,0	0,045	3,66	2,28	17,60	0,034	0,01	0,015	0,34	0,09	0,11	0,13	0,01	0,035	24,33	0,032			
315	6,2	0,090	2,44	3,33	0,11	0,040	0	0,001	0,84	0,18	0,20	0,19	0,009	0,005	7,44	0,026			
Среднее / Average	6,4	0,066	3,78	3,04	6,06	0,034	0,07	0,002	1,00	0,19	0,25	0,25	0,08	0,154	14,83	0,034			
max	6,8	0,103	7,32	4,38	23,10	0,051	0,35	0,015	4,64	0,40	0,85	0,45	0,50	0,458	34,59	0,069			
min	6,1	0,015	1,22	1,58	0,11	0,005	0	0,001	0,07	0,09	0,11	0,13	0,001	0,003	5,57	0,009			
В целом, оз. Байкал Overall, Lake Baikal [5]	6,4	0,089	4,14	3,33	3,70	0,03	0,16	0,004	1,54	0,31	0,29	0,52	0,16	0,09	11,1	0,050			
ПДК, ОДК [6, 7] MPC, UEC [6, 7]		0,7–1,5	–	350	500	–	130	0,001	180	50	40–50	120–200	0,40	–	–	0,050			

Примечание: Σ* – минерализация; Petrol. – нефтепродукты; Susp. – взвешенные вещества (твёрдый остаток на фильтре, пыль). ПДК, ОДК – вод для питьевых и рыбохозяйственных нужд [6, 7]; прочерк – ПДК и ОДК не установлены.

Note: Σ* – mineralization; Petrol. – petroleum products; Susp. – suspended substance (solid residue on filter, dust). MPC, UEC of water for drinking and fisheries needs [6, 7]; dash – MPC and UEC are not established.

Таблица 2 / Table 2
 Валовое содержание макро- и микроэлементов в снеговой воде (мг/дм³) ключевых участков побережья и акватории оз. Байкал
 Contents of macro- and microelements in snow water (mg/dm³) at key areas of the coast and water area of Lake Baikal

№ площадки Key area	Mo	Mn	Ba	Al	Pb	Ni	Cu	Be	V	Cr	Fe	Si	Zn	Sr	Ti	Co	Cd	Hg, мкг/дм ³ µg/dm ³
221	0,005	0,007	0,003	0,016	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,001	0,009	0,001	0,004	0,008	0,001	0,001	0,001	0,11
223	0,001	0,010	0,002	0,025	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,019	0,001	0,001	0,005	0,001	0,001	0,001	0,08
298	0,004	0,003	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,005	0,002	0,047	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,12
299	0,002	0,006	0,002	0,072	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,070	0,146	0,001	0,004	0,008	0,002	0,002	0,14
302	0,023	0,006	0,002	0,072	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,070	0,246	0,001	0,004	0,008	0,001	0,001	0,10
304	0,005	0,002	0,004	0,008	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,002	0,006	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,21
307	0,004	0,003	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,005	0,002	0,047	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,14
308	0,001	0,028	0,006	0,071	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,069	0,113	0,002	0,010	0,006	0,002	0,002	0,15
310	0,004	0,003	0,001	0,008	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,004	0,005	0,765	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,10
315	0,004	0,003	0,001	0,008	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,004	0,005	0,365	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,11
Среднее Average	0,003	0,006	0,003	0,026	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,023	0,106	0,002	0,005	0,002	0,001	0,001	0,13
max	0,023	0,028	0,006	0,072	0,001	0,002	0,004	0,002	0,004	0,005	0,070	0,765	0,004	0,010	0,008	0,002	0,002	0,21
min	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,08
В целом оз. Байкал Overall, Lake Baikal	0,005	0,008	0,004	0,018	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,012	0,088	0,005	0,010	0,002	0,001	0,001	0,25
ПДК, ОДК MPC, UEC	0,25	0,1	0,7	0,5	0,001	0,02	1,0	0,002	-	0,05	0,3	10	5,0- 1,0	7	-	0,1	0,001- 0,005	0,3-0,5

Таблица 3 / Table 3

Содержание химических элементов и веществ в воде озера Байкал и р. Сарма
Content of chemical elements and substances in water of Lake Baikal and the Sarma River

Компонент Component	Малое Море Maloe More n = 19			Прибрежные воды Coastal waters n = 26	Средний бассейн оз. Байкал Middle basin of Lake Baikal, n = 65	Река Сарма The Sarma River, n = 9			ПДК, ОДК МРС, УЕС
	max	min	среднее average			max	min	среднее average	
pH	7,81	7,08	7,66	8,01	7,33	8,28	7,81	7,98	–
F ⁻	0,146	0,008	0,122	0,200	0,122	0,191	0,070	0,112	0,7–1,5
HCO ₃ ⁻	65,74	10,01	40,13	81,07	40,13	82,02	36,50	60,32	–
Cl ⁻	1,61	0,10	0,40	1,50	0,30	2,50	0,20	0,67	350
SO ₄ ²⁻	24,75	2,18	6,10	25,08	7,37	20,10	1,60	5,23	500
NO ₂ ⁻	0,05	0,01	0,03	1,26	0,06	0,05	0,01	0,02	–
NO ₃ ⁻	4,67	0,01	0,65	55,00	0,05	11,60	0,01	2,67	130
PO ₄ ³⁻	0,01	0,001	0,003	0,061	0,001	0,060	0,002	0,028	0,001
Ca ²⁺	21,54	15,01	18,54	41,10	15,13	37,63	16,80	28,24	180
Mg ²⁺	5,02	3,69	3,99	8,78	2,78	8,55	3,41	6,34	50
K ⁺	1,91	0,90	1,19	2,18	1,43	1,89	0,31	0,75	40–50
Na ⁺	3,98	2,01	3,50	8,51	2,75	3,36	0,67	1,73	120–200
NH ₄ ⁺	0,400	0,010	0,055	0,640	0,015	0,036	0,005	0,019	0,4
Mo	0,035	0,002	0,020	0,102	0,004	0,009	0,001	0,005	0,25
Mn	0,003	0,002	0,002	0,029	0,002	0,010	0,001	0,007	0,1
Ba	0,050	0,009	0,021	0,070	0,013	0,019	0,009	0,016	0,7
Al	0,061	0,010	0,036	0,120	0,017	0,057	0,001	0,030	0,5
Pb	0,006	0,001	0,002	0,060	0,001	0,011	0,001	0,002	0,001
Ni	0,002	0,001	0,001	0,002	0	0,001	0,001	0,001	0,02
Cu	0,009	0,001	0,006	0,026	0,003	0,001	0,001	0,001	1,0
Be	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0	0	0	0,002
V	0,065	0,001	0,030	0,007	0,001	0,004	0,001	0,002	–
Cr	0,003	0,001	0,001	0,010	0,001	0	0	0	0,05
Fe	0,013	0,003	0,030	0,014	0,006	0,080	0	0,028	0,3
Si	5,600	0,294	0,720	6,510	0,219	4,610	2,536	3,769	10
Zn	0,007	0,004	0,005	0,090	0,001	0,012	0,002	0,009	5–1
Sr	0,530	0,065	0,189	0,620	0,044	0,127	0,058	0,097	7
Ti	0,015	0,001	0,006	0,002	0,001	0,006	0,001	0,003	–
Co	0,030	0,003	0,009	0,002	0,001	0,001	0	0	0,1
Cd	0,001	0	0,001	0,003	0	0,001	0	0	0,001
Hg	0,01	0,01	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01	0,01	0,3–0,5
Petrol.	0,026	0,004	0,018	0,045	0,018	0,016	0,003	0,009	0,05
Susp.	0,026	0,005	0,011	0,108	0,010	0,080	0,035	0,050	–
Σ	113,27	37,43	86,43	160,32	69,38	129,62	96,53	109,00	–

Примечание: n – количество проб; условные обозначения и единицы измерений приведены в таблице 1 и 2.

Note: n – number of samples; see Table 1 and 2 for schematic symbols and units.

(R_K) химических элементов в снеге побережья по отношению к их содержанию на фоновой территории (условно «чистой», не затронутой деятельностью человека) [5] имеют значения: SO₄²⁻ – 6,3; NH₄⁺ – 5,6; PO₄³⁻ – 3,8; K⁺ – 2,9; NO₃⁻ – 2,2; F⁻ – 1,2; Si – 8,7; Fe – 5,8; Mo –

4,6; Al – 4; Ti – 4; Mn – 3,5; Cr – 2,5; Ni – 2; V – 2; Ba – 1,5; нефтепродукты – 1,4 (табл. 1, 2). Концентрация PO₄³⁻ и нефтепродуктов в снеговой воде побережья превышают ПДК [6, 7] в 3,8 и 1,4 раза. При таянии снеговые воды стекают по мерзлой почве и попадают в реки

Таблица 4 / Table 4

Валовое содержание химических элементов в почвах (мг/кг) побережья Малого моря
Content of chemical elements in soils (mg/kg) of the Maloe More Strait

Координаты Coordinates	Почва Soil	Горизонт Horizon	Mn	Sr	Ba	Zn	Cu	Ni	Pb	Co	Cr	V	Cd
№ 52, N 53°05'48'', E 106°47'46''	каштановая castanozems	aj	1499	103	255	88	220	286	7	6	38	45	<0,05
		bmk	2608	51	430	109	284	270	10	5	33	42	
		вм	2623	95	490	102	214	278	11	6	44	48	
№ 55, N 53°05'56'', E 106°48'00''	тёмно- гумусовая umbrisols	au	1508	45	285	91	169	242	14	4	37	41	
		[ru ₁]	1556	39	316	66	183	259	13	6	41	50	
		с	1310	40	312	62	200	311	14	6	46	61	
№ 19, N 53°06'18'', E 106°50'56''	аллювиальная торфяно- глеявая histic gleyic fluvisols	tmr	204	49	41	53	17	22	15	9	31	29	
		cg	54	25	23	8,7	6,3	7	5	3	6,2	2	
№ 18, N 53°06'04'', E 106°52'06''	аллювиальная перегнойно- глеявая humic gleyic fluvisols	tmr	824	135	91	50	12	9	9	12	9,3	4	
		hmr	164	26	35	36	11	17	11	7	19	12	
		g	120	18	22	37	11	17	12	13	21	14	
		cg	118	17	16	29	6,9	16	7	4	19	12	
№ 297, N 53°07'10'', E 106°51'09''	серая gray soils, folic umbrisols	ay	385	95	77	46	28	20	10	11	39	29	
		ael / bel	405	65	67	51	31	27	13	13	54	40	
		btc	459	54	61	50	40	35	13	17	77	53	
№ 300, N 53°07'30'', E 106°51'42''	тёмно- гумусовая umbrisols	au	596	64	98	26	19	16	16	8	27	21	
		с	245	22	96	28	15	16	18	7	34	18	
№ 60, N 53°04'55'', E 106°46'41''	чернозём chernozems	au	310	180	338	40	62	107	61	27	64	46	
		BCA	621	265	478	46	79	128	25	59	137	78	
ОДК / MPC [9]			-	-	-	220- 110	132- 66	80- 40	130- 65	-	-	-	0,5- 1,0
ПДК / UEC [10]			1500	265	-	91	51	44	10	17	100	114	-

Примечание: ОДК и ПДК – ориентировочно и предельно допустимые концентрации.
Note: MPC, UEC – maximum permissible and indicative concentrations.

и оз. Байкал. Локальное загрязнение снега ТМ зафиксировано в прибрежной зоне озера, что связано не только с антропогенным воздействием населённых пунктов, а также с терригенным переносом пылевых частиц почв и пород во время сильных ветров с «оголённых» (не покрытых снеговым покровом) степных участков побережья. Повышенное содержание нефтепродуктов, NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, PO₄³⁻ и K⁺ в снеге связано с антропогенной деятельностью (бытовые стоки, печное отопление и автотранспорт).

Показатели химического состава воды самого оз. Байкал, с точки зрения её питьевых качеств, соответствует санитарно-гигиеническим нормам. Однако, в прибрежных водах Малого моря обнаружены высокие содержания Pb, PO₄³⁻ и NH₄⁺, превышающие

ПДК вблизи населённых пунктов Сарма и Кулура (табл. 3).

Концентрации Pb в прибрежных водах Малого моря напротив п. Сарма достигают 0,06 мг/дм³, п. Кулура – 0,009 мг/дм³. Источником загрязнения прибрежных вод свинцом являются: почвообразующие породы с его высоким содержанием, сжигание углей при печном отоплении и моторное топливо. Максимальные концентрации фосфатов (PO₄³⁻) выявлены в прибрежных водах озера напротив х. Кулура – 0,06 мг/дм³, п. Сарма – 0,04 мг/дм³, что связано с поступлением в воду бытовых стоков и моющих средств, вследствие чего может происходить зарастание водных объектов. Максимальные концентрации NH₄⁺ в воде побережья озера напротив населённых пунктов Кулура и Сарма имеют значения –

0,64 и 0,55 мг/дм³. Источниками загрязнения прибрежных вод являются неочищенные воды канализаций и диффузных фильтраций из индивидуальных септиков. В водах рек Анга и Сарма выявлены высокие концентрации Рb и PO₄³⁻, превышающие ПДК.

Установлена нейтральная реакция среды (6,8–7,3 ед.) в тёмногумусовой почве с щелочными погребёнными горизонтами (8,2–8,4 ед.). Остальные почвы исследуемой территории в основном со слабощелочной и щелочной реакцией (7,6–8,4 ед.). Нижние горизонты аллювиальной перегнойно-глеевой, а также верхние горизонты аллювиальной торфяно-глеевой и серой почвы близки к нейтральной реакции среды (6,2–7,2 ед.). Исследуемые почвы в основном с высоким содержанием органического углерода, которое, например, в тёмногумусовой почве достигает 17%. Почвы преимущественно супесчаного и лёгкосуглинистого гранулометрического состава (сумма фракций < 0,01 варьирует от 16 до 24%).

Высокие концентрации никеля и меди установлены в каштановой и тёмногумусовой почвах на месте туристических стоянок (табл. 4). Содержание никеля в почвах превышает санитарно-гигиенические нормы в 2,5–4 раза, меди – в 1,1–2 раза. На тех же площадках выявлены повышенные концентрации марганца в каштановой и тёмногумусовой почвах, превышающие ПДК в 1,7 раза. Обнаружено высокое содержание никеля, кобальта, хрома и свинца, превышающее ПДК в 1,4–2 раза в чернозёме на побережье вблизи научно-учебной базы Иркутского государственного университета, заброшенного рыбохозяйственного комплекса и туристической базы. В аллювиальной перегнойно-глеевой и торфяно-глеевой почвах побережья, а также в серой и тёмногумусовой почвах на присклоновой территории с наименьшей антропогенной нагрузкой высоких значений концентрации ТМ не зафиксировано.

В результате проведённых исследований обнаружены более высокие концентрации ТМ в почвах на остепнённых участках предгорий и побережья с большой рекреационной нагрузкой по сравнению с почвами среднегорий таёжных лесов и заболоченных лугов, которые редко посещают туристы. Источником загрязнения почв ТМ могут являться также почвообразующие породы. На территории исследования встречаются почвы с высоким содержанием Fe и химических элементов его группы, вследствие того, что в Приольхонье

зафиксированы проявления аккумуляций меди и железа [4]. В Приольхонье вели добычу полезных ископаемых, в основном на небольших месторождениях фосфоритов, пегматитов, железных и марганцевых руд.

Заключение

Современное экологическое состояние почв и поверхностных вод побережья Малого моря оценивается как неудовлетворительное со средним уровнем загрязнения. Локальное загрязнение снегового покрова акватории оз. Байкал выявлено около турбаз и прибрежных населённых пунктов побережья. Санитарно-гигиеническое состояние воды самого оз. Байкал в данное время удовлетворительное. Загрязняющие вещества аккумулируются в почвах побережья и устьев рек, а попавшие повышенные концентрации их разбавляются большим количеством воды озера. Установлено высокое содержание токсичных элементов и веществ в почвах вблизи населённых пунктов побережья и прибрежных водах Малого моря. Обнаружены высокие концентрации фосфатов и свинца в воде рек Анга и Сарма.

Почвы вблизи туристических стоянок и населённых пунктов загрязнены ТМ, превышающие санитарно-гигиенические нормы. Щелочной и органогенный геохимические барьеры способствуют накоплению ТМ в почвах побережья и устьев рек, т. е. они являются сдерживающим фактором поступления загрязняющих веществ в Байкал. При благоприятных условиях, например, при подкислении в условиях лёгкого гранулометрического состава почв, загрязняющие вещества могут мигрировать и поступать в прибрежные воды Малого моря, что установлено проведёнными исследованиями. Выявлено, что наиболее высокие концентрации ТМ наблюдаются в поверхностных и прибрежных водах, а также в почвах рекреационной зоны побережья Байкала. Кроме того, имеется природный источник загрязнения почв ТМ – почвообразующие породы. Тяжёлые металлы в поверхностных водах способны аккумулироваться в водных растениях прибрежных территорий и негативно влиять на здоровье людей, которые употребляют данную воду для питья [9, 10].

Исследование выполнено за счёт средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А21-121012190055-7, АААА-А19-119080700040-8) и при финансовой

поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-44020 Монг_т.

References

1. Ecologically focused planning of land use in the Baikal region. Olkhon district / Ed. A.N. Antipov. Irkutsk: IG SB RAS, 2004. 147 p. (in Russian).
2. Znamenskaya T.I., Vanteeva J.V., Solodyankina S.V. Factors of the development of water erosion in the zone of recreation activity in the Ol'khon region // Eurasian Soil Science. 2018. No. 2. P. 221–228. doi: 10.1134/S1064229318020151
3. Shpeyzer G.M., Mineeva L.A. Guide to the chemical analysis of waters: a methodical grant. Irkutsk state university, 2006. 55 p. [Internet resource] <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/170/37170> (Accessed: 03.02.2021) (in Russian).
4. Theory and practice of chemical analysis of soils / Ed. L.A. Vorobyov. Moskva: GEOS, 2006. 399 p. (in Russian).
5. Belozertseva I.A., Vorobyova I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Yanchuk M.S. Snow pollution in lake Baikal water area in Nearby Land Areas // Water Resources. 2017. No. 1. P. 471–484. doi: 10.1134/S0097807817030046
6. GN 2.1.5.1315-03. The maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in water of water objects of economic and drinking and cultural and community water use. 2003 [Internet resource] http://www.infosait.ru/norma_doc/41/41363/index.htm (Accessed: 30.08.2020) (in Russian).
7. The maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: hygienic standards of GN 2.1.7.2041-06. Moskva: Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. 15 p. (in Russian).
8. The maximum indicative concentrations (UEC) of chemicals in the soil. Hygienic standards of GN 2.1.7.2042-06. Moskva: Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. 11 p. (in Russian).
9. Galiulin R.V., Galiulina R.A., Kochurov B.I. Accumulation of heavy metals by water plants in conditions of technogenesis // Theoretical and Applied Ecology. 2013. No. 2. P. 81–85 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-2-081-085
10. Galiulin R.V., Galiulina R.A., Kochurov B.I. Technogenesis contamination of environment by carcinogenic substances // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 2. P. 42–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-042-042-046

Биоразнообразие и микоризообразование лекарственных растений на залежных участках

© 2021. Н. В. Лиханова, к. б. н., ведущий специалист, педагог,
Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский проспект, д. 55,
Региональный центр выявления и поддержки одарённых детей
в области искусства, спорта и науки в Республике Коми,
167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Печорская, д. 28,
e-mail: lihanad@mail.ru

Рассмотрено разнообразие лекарственных растений на залежных участках Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина. Сад занимает площадь 32 га, естественные фитоценозы составляют 17 га, из них залежные земли – 24%. Выявлено 92 вида из 77 родов 29 семейств, в том числе – 77 видов лекарственных растений из 64 родов 24 семейств. Травяной покров густой. Общее проективное покрытие меняется от 5 до 80%. Почва подзолистая на суглинистых почвообразующих породах.

Представлены результаты исследований интенсивности микоризной инфекции, степени микоризации корневой системы, встречаемость гиф, арбускул и везикул арбускулярных грибов в корнях некоторых видов лекарственных растений при их произрастании в естественных условиях. Степень их микотрофности колеблется от 2,15 до 3,58 баллов. Отмечена высокая фрагментарность в распределении гриба в корнях растения-хозяина (частота встречаемости равна 50%). Интенсивность микоризной инфекции у микотрофных видов лекарственных растений располагается в пределах от 19,5 до 47,9%. Средняя интенсивность микоризной инфекции в данном фитоценозе составляет 30,4%. Выявлены не микоризные семейства растений: Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Brassicaceae, Boraginaceae, Polygonaceae, Scrophulariaceae. Проведённый нами анализ показал отсутствие положительной связи между уровнем развития микоризной инфекции и общим проективным покрытием растений в данном сообществе. У подавляющего большинства микотрофных лекарственных растений везикулы встречаются редко. Такое состояние, вероятно, можно связать с условиями обитания растений. Плохая аэрация залежных участков и низкие температуры почв исследуемого региона не способствуют развитию грибного мицелия.

Ключевые слова: залежные участки, биоразнообразие, лекарственные растения, арбускулярная микориза.

Biodiversity and mycorrhizal formation of medicinal plants in the fallow areas of the Botanical garden

© 2021. N. V. Likhanova ^{ORCID: 0000-0002-4317-7872}
Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,
55, Oktyabrsky Prospekt, Syktyvkar, Russia, 167001,
Regional center for the identification and support of gifted children
in the field of art, sports and science in the Komi Republic,
28, Pechorskaya St., Syktyvkar, Russia, 167000,
e-mail: lihanad@mail.ru

The variety of medicinal plants in the fallow areas of the Botanical garden of Pitirim Sorokin Syktyvkar State University is considered. The garden covers an area of 32 hectares, where natural make up 17 hectares, 24% of which fallow lands occupy. 92 species from 77 genera of 29 families, including 77 species of medicinal plants from 64 genera of 24 families were revealed. Grass cover is thick. The total projective cover varies from 5 to 80%. The soil was identified as podzolic on loamy soil-forming rocks.

The results of studies of the intensity of mycorrhizal infection, the degree of mycorization of the root system, the occurrence of hyphae, vesicles and arbuscule of arbuscular fungi in roots of some species of medicinal plants during their growth in vivo are presented. The degree of their mycotrophy varies from 2.15 to 3.58 points. A high fragmentation in the distribution of the fungus in the roots of the host plant was noted (the frequency of occurrence is 50%). The intensity of mycorrhizal infections in mycotrophic species of medicinal plants ranges from 19.5 to 47.9%. The average intensity of mycorrhizal infection in this phytocenosis is 30.4%. Not mycorrhizal plant families were: Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Brassicaceae, Boraginaceae, Polygonaceae, Amaryllidaceae. The analysis of medicinal plants of different status showed the absence of a positive relationship between the level of mycorrhizal infection and the overall projective cover

of the plant in this community. Analyzing the development of mycorrhiza in different families, we are convinced that the vast majority of mycotrophic medicinal plants vesicles are rare. This condition can probably be associated with the living conditions of plants. Poor aeration of fallow areas and low soil temperatures of the studied region do not contribute to the development of fungal mycelium.

Keywords: fallow areas, biodiversity, medicinal plants, arbuscular mycorrhizae.

В настоящее время весьма актуальной является проблема получения лекарственного сырья. Производство культивируемых лекарственных растений отстаёт в своём развитии от потребностей фармацевтического производства. Возрастание потребности в лекарственном сырье отражается на запасах, незначительно представленных в составе естественной флоры. Исчезновению некоторых видов лекарственных растений способствуют хозяйственная деятельность, загрязнение атмосферы и деградация почвенного покрова. В связи с этим возрастает необходимость искусственного выращивания лекарственных растений, что позволит расширить ассортимент используемых видов, обеспечить получение доброкачественного сырья. Фармакологические ассоциации придают огромное значение изучению не только химического состава, но и механизмов адаптации лекарственных растений к условиям произрастания. Одним из способов усиления адаптации является симбиоз корней лекарственного растения с грибами.

Накоплен значительный материал, характеризующий различия строения корневых систем микоризных и безмикоризных растений в сообществах разных растительных зон [1–6]. Наиболее распространённый тип микоризы травянистых растений – арбускулярный. Морфологическая картина трансформации корней при образовании арбускулярной микоризы состоит в проникновении внутрь первичной коры корней гиф арбускулярно-микоризных грибов и образовании специализированных структур: арбускул (древовидных разветвлённых гиф в клетках коры) и визикул (округлых расширений гиф). Типологические и количественные характеристики микориз зависят от жизненных форм и эколого-физиологических свойств растений [7–11]. Микосимбиотические связи травянистых лекарственных растений с микоризными грибами на территории Республики Коми изучены очень слабо. Цель работы состояла в оценке биоразнообразия и микоризообразования некоторых видов лекарственных травянистых растений на территории ботанического сада Сыктывкарского государственного университета им. Питирима Сорокина (СГУ).

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на залежных участках Ботанического сада СГУ (61°64' с. ш. и 50°74' в. д.) общей площадью 4,0 га. Геоботаническое описание видов растений приводили по [12]. На исследуемом участке закладывали стандартные пробные геоботанические участки 10 × 10 м и оценивали видовой состав и общее проективное покрытие (ОПП). Материал собирали в летний период 2016 и 2017 гг. Растения выкапывали в характерных для каждого вида местообитаниях. Для изучения микоризы лекарственных травянистых растений отбирали корни растений в десятикратной повторности, которые затем высушивали и обрабатывали по общепринятой методике [2, 13]. Были изучены следующие параметры, характеризующие микоризообразование: степень микотрофности, интенсивность микоризной инфекции, частоту встречаемости микоризной инфекции. Степень микотрофности (*D*, балл) характеризует обилие грибов в корне. По [2] растения по данному показателю условно делят на 3 группы: высокомикотрофные (3,6–5,0), среднемикотрофные (1,8–3,5) и слабомикотрофные (0,1–1,7 балла). Интенсивность микоризной инфекции (*C*, %) – величина, отражающая распределение огрибнённых участков корня, обилие микоризного гриба в нём. Частота встречаемости микоризной инфекции (*F*, %) характеризует соотношение между огрибнёнными и неогрибнёнными участками корневой системы растения [2]. Статистическая обработка материалов проведена с использованием пакета прикладных программ Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

Обследуемый залежный участок находится на границе окультуренной и естественной неокультуренной территорий Ботанического сада СГУ. Мезорельеф участка практически ровный, наблюдаются лишь небольшие кочки и понижения, что отражает сельскохозяйственную историю его использования. Во флоре исследуемого участка выявлено 92 вида растений из 77 родов 29 семейств, в том числе – 77 видов лекарственных растений из 64 родов

24 семейств (табл. 1). Средняя видовая насыщенность рода – 1,18, семейства – 3,15; среднее число родов в семействе – 2,62. Замечено полное отсутствие видов сем. Сурегасеае, а также крайняя редкость *Equisetum sylvaticum* (при отсутствии других видов хвощей), что может свидетельствовать о хорошей окультуренности территории: низкой кислотности почв участка и его хорошей дренированности. В составе флоры абсолютно доминируют семенные растения (98,9%); споровые представлены одним видом (1,1%).

Травяной покров густой. Общее проективное покрытие колеблется от 5 до 80%. При ОПП 80% (сор₃) доминирует *Elytrigia repens* (L.) Nevski, при ОПП 50–70% (сор₂) – *Epilobium adenocaulon* Hausskn., *Rumex acetosa* L., *Rumex acetosella* L., *Rumex crispus* L., *Sonchus oleraceus* L., при ОПП 30–50% с обилием (sp.) встречается: *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medikus, *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Leonorus quinquelobatus* Gilib., *Artemisia vulgaris* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg. Доминирование некоторых видов растений ограничено во времени: *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. выступает в роли доминанта в июне.

Снижение видового разнообразия на залежных участках Ботанического сада объясняется, с одной стороны, тем, что демутиация растительности на них ещё не дошла до стадии сомкнутого древостоя из мелколиственных древесных растений. Обработка почвы, проведённая под сельскохозяйственные работы, не позволила сохраниться здесь лесным растениям от прежде произрастающего ельника. С другой стороны, ощутимо влияние

сорно-полевых и адвентивных растений, вызывающих увеличение роли в формировании растительного покрова таких семейств, как Fabaceae, Lamiaceae и Polygonaceae. Почва диагностирована нами как подзолистая на суглинистых почвообразующих породах.

Нормальная микробиота растений представлена ризосферными и эпифитными микроорганизмами. Их численность зависит от возраста и физиологического состояния растений. Основная масса прикорневой микробиоты представлена грибами – базидиомицетами, реже фикомицетами, аксомицетами [14]. Указанные грибы образуют симбиоз (микоризу) с корнями растений, в том числе и лекарственных. Микоризы можно обнаружить в самых различных почвах. Значение микоризных грибов для растений, в том числе и лекарственных, заключается в улучшении водно-минерального питания и защите корневых систем от фитопатогенных организмов. При наличии микоризы растения успешно развиваются, повышается их фитоценотический статус, снижается внутри- и межвидовая конкуренция, тем самым увеличивается видовое богатство растительных сообществ [15].

Материалы, характеризующие некоторые аспекты микоризообразования лекарственных растений на исследуемом участке, представлены в таблице 2. В корнях травянистых растений выявлена зигомицетная везикулярно-арбускулярная эндомикориза, представленная несептированными гифами гриба, везикулами и арбускулами. Степень микотрофности изученных растений колеблется от 2,15 до 3,58 баллов. В основном все изученные

Таблица 1 / Table 1

Состав и структура растений напочвенного покрова залежного участка ботанического сада
Composition and structure of ground cover plants the fallow area of the Botanical garden

Семейство Family	Общее проективное покрытие, % Total projective cover, %	Семейство Family	Общее проективное покрытие, % / Total projective cover, %
Equisetaceae	ед. / single	Violaceae	15
Poaceae	30	Onagraceae	40
Urticaceae	15	Brassicaceae	45
Polygonaceae	35	Caprifoliaceae	15
Chenopodiaceae	15	Valerianaceae	30
Caryophyllaceae	15	Boraginaceae	15
Ranunculaceae	20	Lamiaceae	15
Fabaceae	15	Solanaceae	20
Apiaceae	10	Campanulaceae	20
Rosaceae	15	Scrophulariaceae	15
Geraniaceae	20	Plantaginaceae	5
Hypericaceae	20	Asteraceae	35

Таблица 2 / Table 2

Характеристика микосимбиотрофизма лекарственных растений залежного участка ботанического сада
 Feature of micro symbiotrophy of medicinal plants at the fallow area of the Botanical garden

Название семейств/видов / Family/species name	C, %	D, балл/point	F, %
Valerianaceae			
<i>Valeriana wolgensis</i> Kazak.	23,7	2,54	46
Apiaceae			
<i>Aegopodium podagraria</i> L.	25,7	2,21	32
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	23,8	2,62	28
<i>Eryngium planum</i> L.	0	0	0
<i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden.	0	0	0
Caryophyllaceae Juss.			
Chenopodiaceae Vent.			
Brassicaceae Butnett.			
Boraginaceae			
Scrophulariaceae			
Polygonaceae Juss.			
Fabaceae Lindl.			
<i>Trifolium repens</i> L.	35,2	3,04	58
<i>Vicia hirsute</i> L.	19,5	2,15	38
<i>Vicia cracca</i> L.	20,3	2,21	36
<i>Vicia sepium</i> L.	22,8	2,31	40
Hypericaceae Juss.			
Ranunculaceae Juss.			
<i>Ranunculus repens</i> L.	44,8	3,58	84
Asteraceae			
<i>Artemisia vulgaris</i> L.	32,4	2,22	54
<i>Carduus crispus</i> L.	35,3	2,16	52
<i>Cirsium arvense</i> L. Scop.	30,8	2,08	50
<i>Cirsium heterophyllum</i> L. Hill	25,6	2,57	46
<i>Echinops</i> sp.	21,3	2,34	40
<i>Erigeron acris</i> L.	32,1	2,76	48
<i>Lepidotheca suaveolens</i> (Pursh) Nutt.	31,8	2,64	44
<i>Omalotheca sylvatica</i> (L.) Sch. Bip. & F.W. Schultz	35,1	2,04	41
<i>Pilosella aurantiaca</i> (L.) F.W. Schultz & Sch. Bip.	22,3	2,64	42
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	30,5	2,15	53
<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	33,8	2,36	56
<i>Tussilago farfara</i> L.	42,7	2,55	57
<i>Tripleurospermum perforatum</i> (Merat) M. Lainz	36,8	2,32	56

лекарственные растения умеренно микотрофны. Данный показатель у растений одного вида практически не отличается. Согласно [16], в природных популяциях изменчивость растений по степени микотрофности различается в пределах от 2 до 5, что не противоречит нашим исследованиям.

Лекарственные растения семейства **Ranunculaceae**, **Hypericaceae** отличаются большой частотой встречаемости на корнях микориз – от 72 до 84%. У растений семейств **Valerianaceae**, **Apiaceae**, **Fabaceae**, **Asteraceae**, обладающих лекарственными свойствами, обнаружена средняя (от 28 до 58%) частота

встречаемости микоризной инфекции. У средне- и высокотрофных растений на долю безмикоризных участков приходится 35%. В среднем частота встречаемости микоризной инфекции равна 50%. Неравномерное заселение корневых систем эндофитами связано с малой плотностью популяций этих грибов в почве и с их пониженной активностью в связи с природными условиями [17].

Нами было установлено, что интенсивность микоризной инфекции у микотрофных видов лекарственных растений колеблется от 19,5 до 47,9% (табл. 2). Средняя интенсивность микоризной инфекции в данном фито-

ценозе составляет 30,4%. Проведённый нами анализ лекарственных растений различного статуса показал отсутствие положительной связи между уровнем развития микоризной инфекции и ОПП растения в данном сообществе. Следует отметить, что различия между этими двумя показателями недостоверны ($p > 0,05$) и находятся в пределах случайных колебаний.

Исследования подтвердили сведения о различной представленности микоризной инфекции среди разных семейств [6]: в семействе Asteraceae микоризны 13 из 13 изученных видов, в Ranunculaceae – 2 из 2, в Fabaceae – 4 из 4, Apiaceae – 2 из 4 видов растений. Не обнаружена микориза на корнях у растений из семейств Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Brassicaceae, Boraginaceae, Polygonaceae, Scrophulariaceae, что подтверждает результаты, полученные ранее [1, 18].

У немикотрофных представителей травянистых лекарственных растений корневые окончания более тонкие (до 160 мкм), чем у микотрофных (до 220 мкм).

Согласно литературным данным [6, 19, 20], различия между микотрофными растениями по сравнению с немикотрофными связаны с присутствием флавоноидов. Авторы утверждают, что флавоноиды регулируют сбалансированность отношений между симбионтами.

Анализ развития микоризы у различных семейств показывает, что у подавляющего большинства микотрофных лекарственных растений везикулы встречаются редко. Такое состояние, вероятно, можно связать с условиями обитания растений. Плохая аэрация залежных участков и низкие температуры почв исследуемого региона не способствуют развитию грибного мицелия.

Заключение

Растительный покров залежных участков Ботанического сада оценён как разнотравная залежь с отдельными древесно-кустарничковыми растениями. Во флоре исследуемого объекта выявлено 92 вида растений, в том числе лекарственных растений 84%, 77 родов – 83%, 29 семейств – 83%. Травяной покров густой. Общее проективное покрытие меняется от 5 до 80%.

Установлено, что 23 вида растений (77%) вступают в симбиоз с грибами, 11 видов (23%) не имеют микоризы. Не обнаружена микориза на корнях у растений из семейств

Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Brassicaceae, Boraginaceae, Polygonaceae, Scrophulariaceae.

В распределении гриба в корнях лекарственных растений отмечена высокая фрагментарность (средняя частота встречаемости равна 50%). Средняя интенсивность микоризной инфекции составляет 30,4%. Степень микотрофности варьирует в пределах 2,15–3,58 баллов.

Наличие эндомикоризы и уровень её развития не сопряжены с относительной плотностью проекции отдельных видов лекарственных растений фитоценоза.

Таким образом, в результате исследования показано отсутствие положительной связи между уровнем развития микоризной инфекции и общим проективным покрытием растения в данном сообществе. У подавляющего большинства микотрофных лекарственных растений везикулы встречаются редко. Такое состояние связано с условиями обитания растений. Плохая аэрация залежных участков и низкие температуры почв исследуемого региона не способствуют развитию грибного мицелия.

References

1. Veselkin D.V., Betehtina A.A. Connection of the root structure of herbaceous dicotyledonous plants with their mycorrhizal status // *Doklady Akademii nauk*. 2014. V. 459. No. 5. P. 648–650 (in Russian). doi: 10.1134/s0012496614060064
2. Selivanov I.A. Mikosymbiotrofizm, as a form of consortia relations in the vegetation cover of the Soviet Union. Moskva: Nauka, 1981. 230 p. (in Russian).
3. Brundrett M.C. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis // *Plant and Soil*. 2009. V. 320. No. 1–2. P. 37–77. doi: 10.1007/s11104-008-9877-9
4. Brundrett M.C. Mycorrhizas in natural ecosystems // *Adv. Ecol. Res.* 1991. V. 21. P. 171–313. doi: 10.1016/s0065-2504(08)60099-9
5. John S.T.V. Root size, root hairs and mycorrhizal infection: a re-examination of Baylis's hypothesis with tropical trees // *New Phytol.* 1980. V. 84. No. 3. P. 483–487. doi: 10.1111/j1469-8137.1980.tb04555.x
6. Wang B., Qiu Y.-L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants // *Mycorrhiza*. 2006. V. 16. No. 5. P. 299–363. doi: 10.1007/s00572-005-0033-6
7. Betehtina A.A., Veselkin D.V. The prevalence and intensity of mycorrhiza in grassy plants of the Middle Urals with different types of environmental strategies // *Ekologiya*. 2011. No. 3. P. 176–183 (in Russian). doi: 10.1134/s1067413611030040

8. Veselkin D.V., Lukina N.V., Chubrik T.S. Ratio of mycorrhizal non-mycorizal plant species in primary man-made successions // *Ekologiya*. 2015. No. 5. P. 417–424 (in Russian). doi: 10.1134/s1067413615050203
9. Cornelissen J.H.C., Aerts R., Cerabolini B., Weger M.J.A., Heijden van der M.G.A. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy // *Oecologia*. 2001. V. 129. No. 4. P. 611–619. doi: 10.1007/s004420100752
10. Grime J.P., Hodson J.G., Hunt R. Comparative plant ecology: a functional approach to common British. London: Unwin Hyman, 1988. 742 p. doi: 10.2307/2403674
11. Heijden van der M.G.A., Cornelissen J.H.C. The critical role of plant-microbe interactions on biodiversity and ecosystem functioning: arbuscularmycorrhizal associations as an example // *Biodiversity and ecosystem functioning – synthesis and perspectives*. Oxford: University Press, 2002. P. 181–192.
12. Methodology of field geobotanical research. Moskva-Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1938. 216 p. (in Russian).
13. Kryuger L.V. Endotrophic mycorrhizae of herbaceous plants of some phytocenoses of the Central Urals // *Bot. zhurnal*. 1961. V. 46. No. 5. P. 617–627 (in Russian).
14. Dyakov Yu.T., Sergeev Yu.V. Mycology today. V. 1. Moskva: Natsionalnaya akademiya mikologii, 2007. 376 p. (in Russian).
15. Veselkin D.V. Evolutionary and ecological significance of mycorrhizal associations // *Vestnik KSU. Series “Natural Sciences”*. V. 4. No. 2. P. 75–79 (in Russian).
16. Mukhin V.A., Betekhtina A.A. Adaptive value of endomycorrhizae of herbaceous plants // *Ecology*. 2006. No. 1. P. 3–8 (in Russian). doi: 10.1134/s1067413606010012
17. Agafonov V.A., Perevedentseva L.G. Plant endomycorrhiza of grass of the meadows of the National Park ABISKO (Sweden) // *Vestnik Udmurskogo universiteta*. 2012. V. 3. P. 29–33 (in Russian).
18. Chubrik T.S., Lukina N.V. Mycorrhiza formation on uneven age dumps of the Akkermanovsky iron-ore deposit (steppe zone) // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. No. 12 (212). P. 81–83 (in Russian). doi: 10.25198/1814-6457-212-81
19. Morandi D., Branzanti B., Gianinazzi-Pearson V. Effects of some plant flavonoids on in vitro behavior of an arbuscularmycorrhizal fungi // *Agronomy*. 1992. V. 12. No. 10. P. 811–816. doi: 10.1051/agro:19921012
20. Vierheilig H., Pichi Y. Signalling in arbuscular mycorrhiza: Facts and hypotheses // *Flavonoids in Cell Functions* / Eds. B. Buslig, J. Manthey. Kluwer: Acad. Plenum Pub. New York, 2002. P. 23–39. doi: 10.1007/978-1-4757-5235-9_3

**Альгологический мониторинг почв
в районе объекта «Марадыковский»**

© 2021. К. А. Безденежных¹, аспирант,
Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Е. В. Дабах², к. б. н., с. н. с.,
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 НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

Проведён альгологический мониторинг почв в районе объекта «Марадыковский», на котором с 2006 по 2015 годы осуществлялся процесс уничтожения химического оружия (ХО). Изучалась альгофлора почв лесных и луговых фитоценозов до начала функционирования объекта по уничтожению ХО, в период его деятельности и после завершения работы. Установлено, что таксономический состав альгофлоры лесных и луговых фитоценозов в районе объекта «Марадыковский» после завершения его функционирования сохраняет зональный тип. В лесных экосистемах доминантами сообществ являются зелёные и жёлтозелёные водоросли (представителей родов *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Coccomyxa*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*, *Botrydiopsis*, *Eustigmatos*), в луговых – зелёные водоросли и цианобактерии (ЦБ) (*Chlamydomonas gloeogama*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Cylindrospermum muscicola*, *C. licheniforme*, *Nostoc punctiforme*, *Phormidium autumnale*, *P. formosum*, *Leptolyngbya foveolarum*). На участках в районе объекта отмечено незначительное снижение видового разнообразия альгофлоры по сравнению с условно контрольными участками, удалёнными от объекта на 10 км. Наибольшая численность клеток водорослей и ЦБ характерна для участков пойменных лугов (450–500 тыс. кл./г почвы), наименьшая – для участков суходольных лугов, испытывающих антропогенную нагрузку, – 70 тыс. кл./г почвы. Колебания численности водорослей и ЦБ обусловлены природными факторами и уровнем антропогенной и техногенной нагрузки на экосистемы.

Ключевые слова: водоросли, цианобактерии, почва, фитоценоз, видовое разнообразие, численность клеток.

**Algological monitoring of soils in the vicinity
of the plant “Maradykovskiy”**

© 2021. К. А. Bezdenzhnykh¹ ORCID: 0000-0003-1030-3219[?]
Л. В. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X[?]
Е. В. Dabakh² ORCID: 0000-0002-6088-4819[?]
Т. Я. 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 RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: ecolab2@gmail.com

Algological soil monitoring was carried out in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” where from 2006 to 2015 chemical weapons (CW) decommission had taken place. Soil algal flora of forest and meadow phytocoenoses was researched before bringing the plant of CW decommission into operation, during its work, and after its work completion. Taxonomic composition of algal flora of forest and meadow phytocoenoses the vicinity of the plant “Maradykovskiy” after its work completion is still one of zonal type. In forest ecosystems communities dominants are green and green-yellow algae (representatives of the genera *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Coccomyxa*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*, *Botrydiopsis*, *Eustigmatos*), in meadow ecosystems communities dominants are green algae and cyanobacteria (CB) (*Chlamydomonas gloeogama*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Cylindrospermum muscicola*, *C. licheniforme*, *Nostoc puncti-*

forme, Phormidium autumnale, P. formosum, Leptolyngbya foveolarum). On the sites in the vicinity of the plant species diversity of algal flora is slightly lowered, as compared with the control sites situated at 10 km distance from the plant. It was also stated that the quantity of algal flora is higher at distant sites. The highest number of algae and CB cells is characteristic of the sites on floodplain meadows (450–500 thousand cells per 1 g of soil), the lowest number – on the sites of dry meadows which suffer from anthropogenic load – from 70 to 300 thousand cells per 1 g of soil. Fluctuation of algae number are dependable on natural factors and the degree of anthropogenic and technogenic load on the ecosystems.

Keywords: algae, cyanobacteria, soil, phytocoenosis, species diversity, cells number.

Экологическая оценка состояния природной среды в районах расположения особо опасных предприятий является актуальной проблемой. Экологический мониторинг, составной частью которого является биомониторинг, представляет собой научно-обоснованную систему наблюдений, позволяющую с высокой достоверностью оценивать уровни загрязнения объектов окружающей среды [1]. Почвенные водоросли и ЦБ являются общепризнанными биоиндикаторами в оценке экологического состояния почв [2–6]. Многолетний альгологический мониторинг почв (2004–2019 гг.) проводился в районе расположения объекта хранения и уничтожения химического оружия (ОХУХО) «Марадыковский», на котором с 2006 по 2015 годы осуществлялся процесс уничтожения химического оружия (ХО).

Альгофлора почв лесных и луговых фитоценозов изучалась в периоды до начала функционирования объекта по уничтожению ХО, во время и после завершения его работы.

Целью исследования являлась сравнительная оценка реакции альгоцианофлоры почв лесных и луговых фитоценозов на техногенное и антропогенное воздействие в районе объекта «Марадыковский».

Объекты и методы исследования

Объект «Марадыковский» расположен в 3,2 км северо-восточнее посёлка Мирный Оричевского района Кировской области, в 2,6 км южнее реки Вятки. Обследуемая территория представляет собой склон водораздела, террасы и высокую пойму р. Вятки, находится в условиях континентального умеренного климата, входит в состав подзоны южной тайги [7]. Зональные почвы представлены подзолистыми и дерново-подзолистыми типами, в районе объекта встречаются также аллювиальные, болотные и дерновые почвы. На участках мониторинга отбирали смешанные почвенные образцы, в которых определяли элементный состав методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (PQ-2, El-

emental, Англия) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США), а также подвижные формы тяжёлых металлов (ТМ) и фтора. Все химические анализы выполняли по аттестованным методикам в аккредитованных лабораториях. Состояние почв оценивали по химическим и санитарно-гигиеническим показателям в соответствии с СанПиН 2.1.7.1287-03.

Отбор почвенных проб проводили общепринятыми в почвенно-альгологическом исследовании методами, видовой состав альгофлоры определяли методом постановки чашечных культур со стеклами обрастания [2, 8]. Анализировали свежесобранные почвенные образцы. Для уточнения видовой состава микрофототрофов проводили повторную постановку чашечных культур.

В период функционирования объекта почвенные образцы для анализа альгофлоры отбирали со всех участков комплексного экологического мониторинга, после прекращения его работы было отобрано 72 почвенных образца на 29 площадках мониторинга, из которых 13 площадок покрыто сосновыми лесами, 5 – ельниками, на 8 площадках распространены суходольные луга, на 3 – пойменные луга. В качестве контрольных были выбраны: участок соснового леса со слабоподзолистой песчаной почвой (№ 112), находящийся в удалении от объекта на расстоянии около 10 км, и луговой участок с дерново-подзолистой почвой (№ 114).

Количественный учёт водорослей и ЦБ проводили методом прямого микрофотографирования на мазках [4]. Жизненные формы (биоморфы) почвенных водорослей приведены по [2, 10].

Математическую обработку данных проводили при помощи компьютерной программы Past3.20 по [11, 12].

Результаты и обсуждение

По результатам химического анализа почв, выполненного в 2019 г., было показано, что за пределами промзоны проявляется загрязнение подвижными соединениями

фтора к северо-востоку и востоку от объекта, свинцом – у автодорог, умеренное загрязнение ТМ 1–3 класса опасности (по Z_c , согласно Сан-ПиН 2.1.7.1287-03) – на перерых землях у северо-восточной части периметра ОХУХО. Высокие концентрации ТМ и мышьяка, отмеченные в почвах, сформировавшихся на пермских глинах к востоку и юго-востоку от объекта, и обязывающие по значению Z_c отнести почвы к умеренно загрязненным, связаны, вероятно, с природной аномалией. Ореолы повышенных концентраций, существовавшие в санитарно-защитной зоне объекта до начала уничтожения ХО, сохранились, но не расширились. По санитарно-гигиеническим показателям почвы чистые.

Влияние выбросов от объекта на биоту проявлялось слабо и диагностировалось по содержанию фосфора в лишайниках (на ОХУХО уничтожались фосфорорганические ОБ), закономерно снижающемуся по мере удаления от источника [12].

В лесных и луговых экосистемах в районе объекта «Марадыковский» до начала его функционирования была проведена рекогносцировочная оценка видového разнообразия альгоцианофлоры, отмечены представители ЦБ и водорослей, выявлены участки с локальным негативным воздействием [13]. В период функционирования объекта исследование альгофлоры проводилось ежегодно по программе комплексного экологического мониторинга (2006–2015 гг.). В результате исследований, проведенных до начала и в период уничтожения ХО в 2004–2015 гг. [13], на участках лесных экосистем было отмечено преобладание зеленых водорослей (представителей родов *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Coccomyxa*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*) и желтозеленых (*Botrydiopsis*, *Eustigmatos*). По сравнению с контрольными участками отмечено незначительное снижение видového разнообразия альгофлоры, что согласуется с данными других исследователей [14].

В луговых экосистемах было отмечено 123 вида, в том числе: Cyanobacteria – 36 (29,3%), Chlorophyta – 47 (38,2%), Xanthophyta – 24 (19,5%), Eustigmatophyta – 3 (2,4%), Bacillariophyta – 12 (9,8%), Euglenophyta – 1 (0,8%). По сводным данным [3] в луговых экосистемах ЦБ составляют 33% видového разнообразия, зеленые водоросли – 37%, желтозеленые и эустигматофитовые – 21%, диатомовые – 8%, другие отделы – 1%. Сравнение альгофлоры почв в районе объекта «Марадыковский» с альгофлорой заповедника

«Нургуш» показало, что в окрестностях ОХУХО выше процентное содержание ЦБ (32% относительно 27,3%) и ниже – желтозеленых водорослей (17,6 и 24,2% соответственно). Подобная перестройка состава альгоциано-флоры в сторону увеличения разнообразия ЦБ и уменьшения разнообразия желтозеленых водорослей, согласно нашим наблюдениям и литературным данным, характерна для почв, испытывающих техногенную нагрузку [6].

По разнообразию видов в луговых почвах преобладают зеленые и желтозеленые водоросли. Наибольшее видовое разнообразие ЦБ встречено в аллювиальной дерновой почве.

Количественные показатели развития альгофлоры различаются в зависимости от типа почвы [13]. В дерново-подзолистых почвах суходольного луга минимальные показатели численности клеток составляли 66 тыс. кл./г, максимальные – 500–800 тыс. кл./г. В почвах пойменных лугов эти показатели были значительно выше – 400–466 тыс. кл./г и 2000–3000 тыс. кл./г соответственно.

После прекращения функционирования объекта (2016–2019 гг.), в альгофлоре изученных фитоценозов было выявлено 106 видов микрофототрофов, в том числе, в почвах хвойных лесных экосистем – 60 видов, в почвах луговых экосистем – 95 видов.

Сравнение таксономической структуры альгофлоры в период функционирования объекта и после завершения его работы представлено в таблице 1.

Из анализа таксономической структуры альгофлоры экосистем в районе объекта «Марадыковский» после завершения его функционирования следует, что зональный тип альгофлоры не нарушен. По видовому разнообразию преобладали зеленые водоросли и ЦБ, что характерно для почв лесной зоны [3]. Следует отметить некоторое уменьшение видového разнообразия желтозеленых и эустигматофитовых водорослей, чувствительных к техногенной нагрузке.

Важным показателем систематического разнообразия являются «пропорции» флоры: среднее число видов в порядке (в/п), среднее число видов в семействе (в/с), среднее число родов в семействе (р/с) и среднее число видов в роде (в/р) (табл. 1). По данным [10] для альгофлоры почв лесных биоценозов значения показателей пропорции флоры: в/р – 3,5, в/с – 8,8, р/с – 2,5, по нашим данным пропорции флоры ниже. Список доминирующих видов альгофлоры представлен в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

Систематический спектр почвенных водорослей в районе ОХУХО «Марадыковский»
Systematic range of soil algae in the vicinity of the plant of CW decommission “Maradykovskiy”

Отдел / Group	Число таксонов Number of taxa								Количество общих видов Number of common species	
	порядков orders		семейств families		родов genera		видов species		число number	%
	*	**	1	2	1	2	1	2		
Суанобактерия	3	3	7	7	12	9	41	28	24	54,5
Chlorophyta	13	13	22	22	28	26	52	51	36	53,7
Xanthophyta	3	3	7	6	11	7	18	17	14	70,0
Eustigmatophyta	1	1	1	1	2	1	4	1	1	25,0
Bacillariophyta	3	2	6	5	7	6	11	9	8	66,7
Euglenophyta	1	0	1	0	1	0	1	0	–	–
Всего	24	22	44	41	61	50	127	106	83	55,3
Пропорции флоры / Flora proportions	в/п s/o		в/с s/f		р/с g/f		в/р s/g		–	–
	6,0	4,8	3,1	2,6	1,5	1,2	2,1	2,1	–	–

Примечание: * – 2004–2015 гг.; ** – 2016–2018 гг.; в/п – среднее число видов в порядке, в/с – среднее число видов в семействе, р/с – среднее число родов в семействе, в/р – среднее число видов в роде.

Note: * – 2004–2015 years; ** – 2016–2018 years; s/o – the average number of species in an order; s/f – the average number of species in a family; g/f – the average number of genera in a family; s/g – the average number of species in a genus.

Таблица 2 / Table 2

Состав доминирующего комплекса микрофототрофов в различных фитоценозах
в районе объекта «Марадыковский» / Composition of the dominating complex
of microphototrophs in different phytocoenoses near the plant “Maradykovskiy”

Фитоценоз Phytocoenosis	Доминирующие виды / Dominating species	
	2004–2015 гг. / 2004–2015 years	2016–2018 гг. / 2016–2018 years
Сосновые леса Pine forests	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Pseudococcomyxa simplex</i> , <i>Stichococcus minor</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> , <i>Eustigmatos magnus</i> , <i>Botrydiopsis eriensis</i> , <i>Pleurochloris commutata</i>	<i>Coccomyxa solorinae</i> , <i>Pseudococcomyxa simplex</i> , <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> , <i>Pleurochloris commutata</i> , <i>Vischeria helvetica</i>
Еловые леса Spruce forests	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Pseudococcomyxa simplex</i> , <i>Stichococcus minor</i>	<i>Coccomyxa solorinae</i> , <i>Pseudococcomyxa simplex</i> , <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Vischeria helvetica</i>
Водораздельные луга Watershed meadows	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>P. formosum</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Pleurochloris commutata</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Luticola mutica</i>	<i>Cylindrospermum michailovscoense</i> , <i>Nostoc linckia</i> , <i>Leptolyngbya angustissima</i> , <i>Phormidium jadinianum</i> , <i>P. formosum</i> , <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Characiopsis minima</i> , <i>Pleurochloris commutata</i>
Пойменные луга Floodplain meadows	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Phormidium formosum</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Botrydiopsis eriensis</i> , <i>Xanthonema exile</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Nitzschia palea</i>	<i>Pinnularia borealis</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Leptolyngbya angustissima</i>

Примечание: жирным шрифтом отмечены общие виды.

Note: common species are given in bold type.

Как в период функционирования объекта, так и после завершения его работы в лесных фитоценозах в состав доминирующего комплекса входили ЦБ и представители из отделов зелёных и жёлтозелёных водорослей. Видовой состав доминирующих видов в лесных фитоценозах за период функционирования объекта и после почти не изменился. В луговых экосистемах пойменных лугов состав доминирующих видов имел меньшее сходство и был представлен ЦБ, зелёными и диатомовыми водорослями.

Анализ экологической структуры альгофлоры показал, что на этапе функционирования объекта «Марадыковский» и после его завершения в спектрах жизненных форм водорослей и ЦБ преобладали виды-пациенты С-, Х-, Р-, Сh-форм [15]. Для альгосинузий экосистем лесной зоны индексы жизненных форм в порядке убывания располагаются в последовательности: СХРНСh [10].

После прекращения функционирования объекта «Марадыковский» на участках

мониторинга суходольных лугов выявлено 89 видов микрорототрофов: Cyanobacteria – 24 вида (27,0%), Chlorophyta – 41 видов (46,0%), Ochrophyta – 15 (16,9%) и Bacillariophyta – 9 (10,1%), в почвах пойменных лугов 52 вида: Cyanobacteria – 17 видов (32,7%), Chlorophyta – 17 видов (32,7%), Ochrophyta – 10 (19,2%) и Bacillariophyta – 8 (15,4%) (рис. 1).

Наибольшее количество видов выявлено на участках разнотравно-злакового суходольного луга (37 видов), находящегося в северо-восточном направлении от объекта на расстоянии 4 км (№ 57), и разнотравного луга, находящегося от объекта на расстоянии 10 км в юго-восточном направлении (№111). На данном участке отмечено наибольшее число видов ЦБ, в 2–3 раза выше, чем на других участках.

Сравнение видового разнообразия альгофлоры участков суходольных и пойменных лугов с помощью бинарного индекса Сьеренсена-Чекановского показало варьирование показателя сходства от 18,9 до 55,2%.

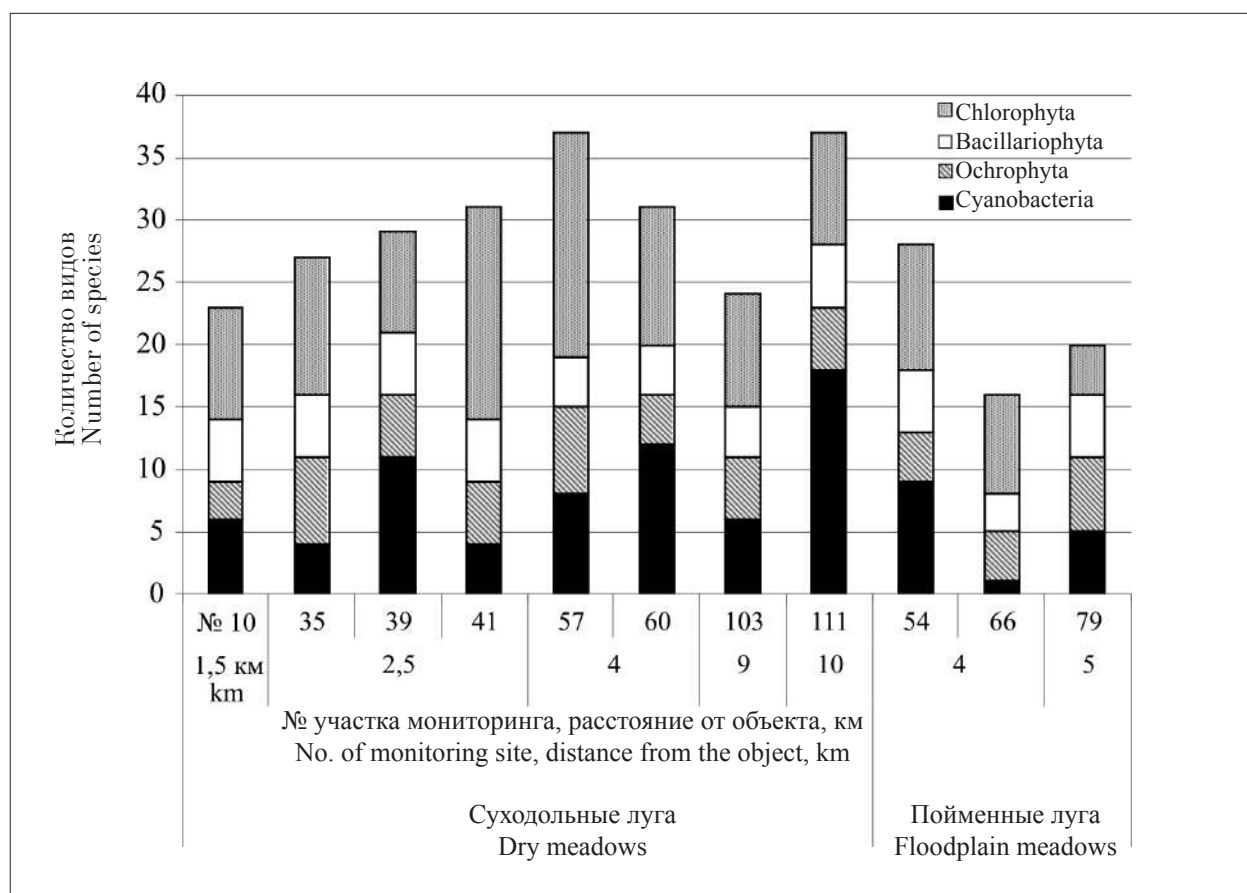


Рис. 1. Количество видов водорослей и цианобактерий на участках луговых фитоценозов в районе объекта «Марадыковский» после прекращения его функционирования
 Fig. 1. The number of algae and cyanobacteria species on the sites of meadow phytocenoses in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” after its work completion

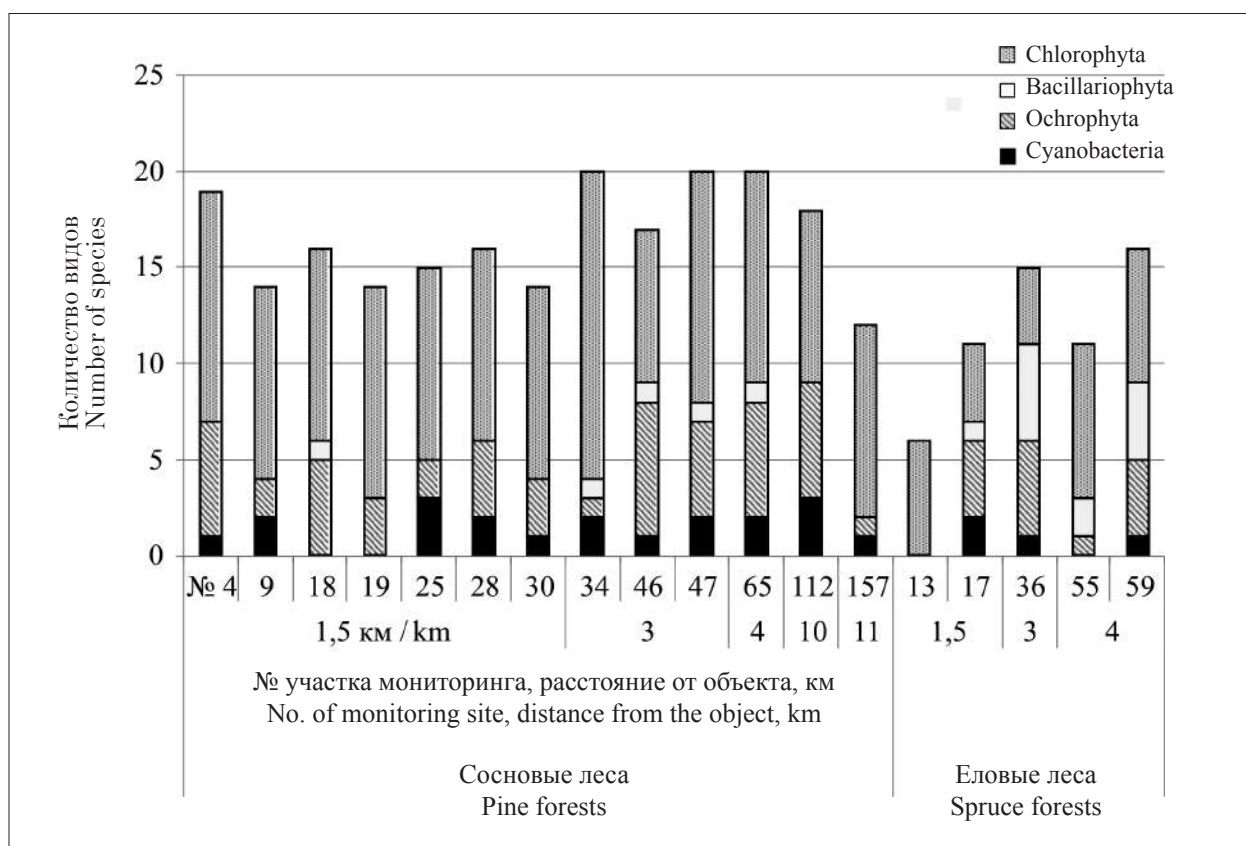


Рис. 2. Количество видов водорослей и цианобактерий на участках лесных фитоценозов в районе объекта «Марадыковский»
Fig. 2. The number of algae and cyanobacteria species on the sites of forest phytocoenoses in the vicinity of the plant “Maradykovskiy”

В среднем индекс Сьеренсена-Чекановского для участков суходольных лугов составляет 38,8%, для пойменных лугов – 36,5%. Доля общих видов в составе альгофлоры суходольных и пойменных лугов – 37,7%.

Количественные параметры альгофлоры луговых почв в районе исследований варьировали в 2016 г. от 235,7 до 379,1 тыс. кл./г почвы, в 2017 г. на большинстве участков численность водорослей и ЦБ снизилась и колебалась от 71,6 до 447,1 тыс. кл./г почвы, в 2018 г. численность изменялась от 109,4 до 513,6 тыс. кл./г почвы (рис. 3). Наибольшая численность клеток водорослей была выявлена на более удалённом от объекта участке пойменного луга № 79, что связано с благоприятными условиями увлажнения пойменных лугов. По количественным показателям доминировала группа зелёных и жёлтозелёных водорослей. Их численность за период исследования варьировала в широких пределах (от 58,3 до 379,3 тыс. кл./г почвы), без выделения чёткой тенденции к увеличению или уменьшению. Цианобактерии по численности в составе альгофлоры были незначительны – от 2 до 56,4 тыс. кл./г почвы (3–19%).

В почвах лесных экосистем после прекращения функционирования объекта было выявлено 60 видов почвенных водорослей и ЦБ: Cyanobacteria – 4 вида (6,7%), Chlorophyta – 36 видов (60,0%), Ochrophyta – 12 (20,0%) и Bacillariophyta – 8 (13,3%) (рис. 2). В почвах участков сосновых фитоценозов было выявлено 55 видов почвенных водорослей, таксономическая структура альгофлоры представлена 4 основными отделами: Cyanobacteria – 4 вида (7,1%), Chlorophyta – 36 видов (64,4%), Ochrophyta – 11 (21,4%) и Bacillariophyta – 4 (7,1%). Несколько меньшее количество видов обнаружено на участках в еловых лесах – 33 вида, таксономическая структура выглядит следующим образом: Cyanobacteria – 4 вида (12,1%), Chlorophyta – 15 видов (45,5%), Ochrophyta – 7 (21,2%) и Bacillariophyta – 7 (21,2%). Доля общих видов для сосновых и еловых лесов составляла 38%.

Для почв лесной зоны численность клеток водорослей и ЦБ выражается числами от нескольких десятков тысяч клеток в 1 г почвы до нескольких сотен и зависит от свойств самой почвы и условий окружающей среды [10].

Поверхностный слой почвы наиболее изменчив по показателям влажности, температуры и освещения, глубокие почвенные горизонты характеризуются относительным постоянством этих показателей. Поэтому экологические характеристики водорослей индивидуальны для конкретных территорий [15]. Значения общей численности водорослей и ЦБ за трёхлетний период исследований колебались от 59,3 до 296,0 тыс. кл./г почвы. Полученные результаты согласуются с данными других авторов для почв хвойных фитоценозов [10, 13, 14]. Отметим, что на контрольном участке соснового леса № 112, находящемся на расстоянии 10 км от ОХУХО «Марадыковский», количественные показатели альгофлоры за трёхлетний период были более высокими и достигали почти 300 тыс. кл./г почвы (рис. 3).

Численность водорослей и ЦБ, а также диапазон варьирования этого показателя на луговых участках выше. Проявляется тенденция к возрастанию численности фототрофов по мере удаления от объекта.

Таким образом, колебания численности водорослей и ЦБ за период исследования обусловлены природными факторами и степенью

развития высших растений, влияющих на влажность, световой и температурный режимы почвы, а также уровнем антропогенной нагрузки.

Заключение

Воздействие ОХУХО «Марадыковский» на почвы проявилось в превышении допустимых концентраций подвижного фтора к северо-востоку и востоку от объекта, валового свинца – вдоль автодорог, мышьяка – к востоку и к северо-западу от объекта. Уровень загрязнения – умеренный. Ореолы повышенных концентраций элементов в почвах санитарно-защитной зоны объекта, существовавшие до начала уничтожения ХО, в последующие периоды не расширились.

Таксономический состав альгофлоры почв лесных и луговых фитоценозов после завершения функционирования объекта сохраняет зональный тип. В лесных экосистемах доминантами сообществ являются зелёные и жёлтозелёные водоросли (представители родов *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Coccomyxa*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*, *Botrydiopsis*,

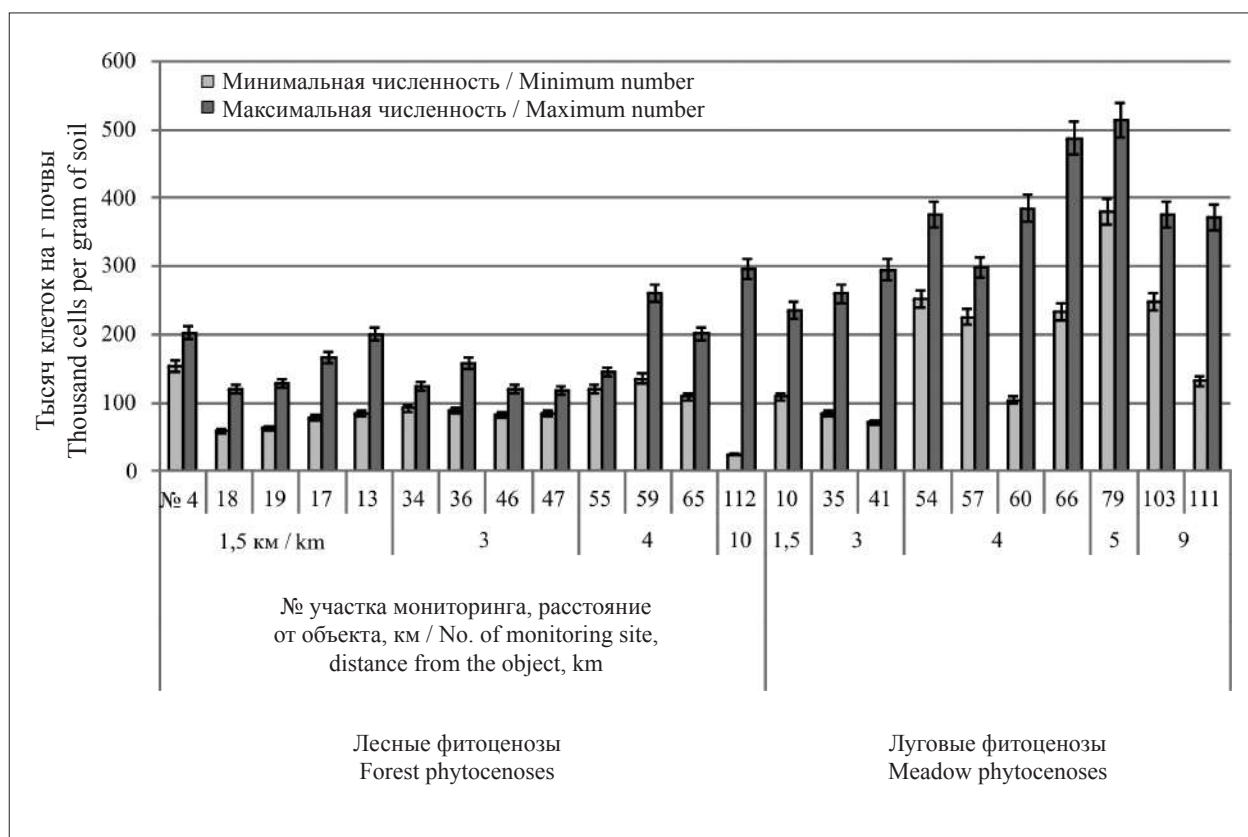


Рис. 3. Колебания численности водорослей и цианобактерий на участках мониторинга за трёхлетний период (2016–2018 гг.)
 Fig. 3. Fluctuation of the number of algae and cyanobacteria on the monitoring sites within the period of three years (2016–2018)

Eustigmatos), в луговых – зелёные водоросли и ЦБ (*Chlamydomonas gloeogama*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Cylindrospermum muscicola*, *C. licheniforme*, *Nostoc punctiforme*, *Phormidium autumnale*, *P. formosum*, *Leptolyngbya foveolarum*). На участках в районе объекта отмечено незначительное снижение видового разнообразия альгофлоры по сравнению с условно контрольными участками, удалёнными от объекта на 10 км. Отмечено некоторое уменьшение видового разнообразия представителей жёлтозелёных и эустигматофитовых водорослей и ЦБ.

Колебания численности водорослей и ЦБ за период исследования обусловлены природными факторами и степенью развития высших растений, влияющих на влажность, световой и температурный режимы почвы, а также уровнем антропогенной и техногенной нагрузки. Наиболее высокие показатели численности альгофлоры выявлены на условно фоновых участках, находящихся на большем удалении от объекта.

Таким образом, при умеренном загрязнении почв вследствие воздействия ОХУХО «Марядыковский» видовой состав и количественные характеристики альгоцианофлоры сохраняют свою структуру, но проявляют чувствительность к оказываемому воздействию.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Dabakh E.V. Organization of ecological monitoring of natural environment in the vicinity of the chemical weapons decommission plant in the Kirov region // Vestnik instituta biologii Komi NTs UrO RAN. 2008. No. 6. P. 6–12 (in Russian).
2. Shtina E.A., Gollerbakh M.M. Soil algae ecology. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).

3. Shtina E.A., Zenova G.M., Manucharova N.A. Algalogical soil monitoring // Pochvovedeniye. 1998. No. 12. P. 1449–1461 (in Russian).
4. Domracheva L.I. Soil “blooming” and the laws of its development. Syktyvkar, 2005. 336 p. (in Russian).
5. Kondakova L.V. Algal-cyanobacterial flora and characteristic features of its development in anthropogenically damaged soils (by the example of south taiga soils of the European part of Russia): avtoref. dis. ... doktora biol. nauk. Syktyvkar, 2012. 34 p. (in Russian).
6. Resistance of soil microbial complexes to anthropogenic factors of the environment. Electronic resource / Eds. L.I. Domracheva, T.Ya. Ashikhmina. Syktyvkar: IB FITs Komi NTs UrO RAN, 2019. 254 p. (in Russian). doi: 10.31140/book-2018-05
7. Geography of the Kirov region. Atlas book. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2015. 80 p. (in Russian).
8. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).
9. Aleksakhina T.I., Shtina E.A. Soil algae of forest biogeocoenoses. Moskva: Nauka, 1984. 148 p. (in Russian).
10. Kobzar A.I. Applies mathematical statistics for engineers and researchers. Moskva: FIZMATLIT, 2006. 816 p. (in Russian).
11. Eliseeva I.I. Statistics. Moskva: Prospekt, 2011. 443 p. (in Russian).
12. Ashikhmina T.Ya., Timonov A.S., Kantor G.Ya., Panteleyeva O.G., Domnina E.V., Dabakh E.V., Ogorodnikova S.Yu., Novoydarskiy Yu.V., Titova V.A. Research of the impact of the chemical weapons decommission plant “Maradykovskiy” on the state of natural environment and its objects // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 3. P. 88–95 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-3-042-088-095
13. Kondakova L.V., Domracheva L.I. Flora of the Vyatka region. Part 2. Algae (Species composition, specific features of water and soil biocoenoses). Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2007. 192 p. (in Russian).
14. Novakovskaya I.V., Patova E.N. Soil algae of spruce forests and their change in conditions of aerotechnogenic pollution. Syktyvkar, 2012. 128 p. (in Russian).
15. Kondakova L.V., Bezdenezhnykh K.A., Ashikhmina T.Ya. Algological analysis of soil state in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” after it finished functioning // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 23–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-023-029
16. Madigan M.T., Imhoff J.F. International committee on systematics of procaryotes. Subcommittee on the taxonomy of phototrophic bacteria // Intern. J. Syst. Evol. Microbiol. 2007. No. 57. P. 1169–1171. doi: 10.1099/ij.s.0.65116-0

Особенности трансформации старого нефтяного загрязнения в почвах Арктической зоны Якутии

© 2021. Ю. С. Глянцева, к. х. н., зав. лабораторией, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Россия, г. Якутск, ул. Петровского, д. 2, e-mail: glyaz1408@mail.ru

Проведены эколого-аналитические исследования по изучению особенностей химического состава почв, загрязнённых нефтепродуктами на территории нефтебазы, расположенной в арктической зоне Республики Саха (Якутия) (Нижнеколымский район). Для характеристики состава нефтяного загрязнения и оценки особенностей процессов его биodeградации в мерзлотных почвах использован ряд информативных показателей на основе применения комплекса аналитических методов. Выявлены особенности химического состава почв, загрязнённых нефтепродуктами в результате давнего разлива, которые учитывались при разработке способов очистки почв от «старых» нефтезагрязнений. В результате проведённого эксперимента по биологической очистке почв с помощью микробного биопрепарата, основу которого составляют аборигенные углеводородокисляющие микроорганизмы, было установлено, что за 3 месяца инкубации биопрепарата, наряду с уменьшением остаточного содержания нефти, изменился и состав загрязнения в сторону увеличения содержания смолисто-асфальтеновых компонентов и уменьшения углеводородов. В химической структуре спирто-бензольных смол значительно возросла доля кислородсодержащих групп и связей. В составе алкановых углеводородов установлено перераспределение внутри гомологических рядов, а также между различными рядами гомологов. Степень деструкции нефтезагрязнения составила 56,6%.

Ключевые слова: трансформация, старое нефтезагрязнение, биodeградация, мерзлотные почвы, смолисто-асфальтеновые компоненты.

Features of transformation of old oil pollution in the soils of the Arctic zone of Yakutia

© 2021. Yu. S. Glyaznetsova ^{ORCID: 0000-0002-9195-5296}
Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”
Institute of Oil and Gas Problems SB of the RAS,
1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677980,
e-mail: glyaz1408@mail.ru

In the Arctic zone of Yakutia, ecological and analytical studies have been carried out to study the chemical composition of the oil-contaminated soils of the tank farm. The row of informative analytical indicators was used to characterize the composition of oil pollution and assess the features of its biodegradation processes in permafrost soils. The features of the chemical composition of oil pollution in soil samples with a long-term contamination are revealed and are taken into account at developing methods for cleaning soils from “old” oil pollution. An experiment on the biological treatment of soils with a biological product based on indigenous hydrocarbon-oxidizing microorganisms isolated from permafrost soils was conducted. After 3 months of incubation of a biological product, along with a decrease in the residual oil content, the composition of pollution changed in the direction of increasing the content of resin-asphaltene components and decreasing hydrocarbons. The proportion of oxygen-containing groups and bonds has significantly increased in the chemical structure of alcohol-benzene resin. In the composition of alkane hydrocarbons, a redistribution is found both within the homologous series and between different rows of homologues. The established increase in the ratio $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ in the row: oil (as a pollutant) – initial “old” pollution – altered pollution after 3 months of incubation of the biological product, indicates the destruction of n-alkanes nC_{17} and nC_{18} , which are least resistant to biodegradation, and relative accumulation more stable isoprenoids of pristane and phytane. The degree of destruction of oil pollution reached 56.6%.

Keywords: transformation, old oil pollution, biodegradation, permafrost soils, resins and asphaltenes components.

Как показывает международная практика ликвидации аварийных разливов нефти и их последствий, в арктических условиях удаётся собрать и утилизировать всего 10–15% нефти, что обусловлено суровыми климатическими условиями, отсутствием развитой инфраструктуры и удалённостью поисковых и спасательных служб [1, 2]. Наиболее опасным источником нефтяного загрязнения являются разливы нефтепродуктов при их транспортировке, которая осуществляется как морским путём, так и по рекам [1, 3, 4]. По мнению учёных, освоение ресурсов арктического шельфа должно сопровождаться опережающим изучением экологического состояния прибрежно-шельфовой зоны, выявлением «горячих точек» с высоким уровнем нефтезагрязнения и разработкой эффективных и экологичных способов восстановления нарушенных земель [1, 4].

Для арктических морей основной вклад в суммарное поступление нефтяных углеводородов вносят речные стоки [1, 4, 5]. В Якутии для обеспечения жизнедеятельности населения и предприятий завоз нефтепродуктов осуществляется из других регионов. В труднодоступные и арктические районы нефтепродукты доставляются по рекам, по берегам которых расположены нефтебазы. Транспортировка нефтепродуктов и эксплуатация нефтебаз сопровождается риском загрязнения водных объектов и береговой части суши [6]. Нефтезагрязнение обладает способностью к миграции в почвенном профиле, поэтому первоначально локальное загрязнение может распространяться на большие территории [7–11]. Уровень загрязнения почв на территории нефтебаз варьирует в широких пределах, что зависит от многих факторов: от состава нефтепродуктов, масштаба разлива, срока его возникновения, продолжительности, почвенно-географических особенностей местности и др. [10, 12, 13].

Целью данной работы были эколого-аналитические исследования по изучению углеводородного состояния почв на участке нефтебазы с давним сроком загрязнения и проведение экспериментальных работ для оценки эффективности его биологической очистки почв.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования была выбрана территория нефтебазы, расположенная на берегу реки Колыма в Арктической зоне Республики Саха (Якутия) (Нижнеколымский район), эксплуатация которой ведётся с 1970 г.

Исследования были направлены на выяснение особенностей состава «старых» нефтезагрязнённых почв, образованных за счёт накопления загрязнения за долгие годы эксплуатации нефтебазы. Для сравнения был изучен состав нефти, как одного из загрязнителей почв, и состав фоновой пробы почвы, отобранной на границе территории нефтебазы на значительном удалении от источников загрязнения.

С целью испытания разработанного в Институте проблем нефти и газа СО РАН биопрепарата для очистки почв от нефти, на загрязнённой территории нефтебазы был заложен экспериментальный участок площадью 120 м². Основу биопрепарата составляли аборигенные углеводородокисляющие микроорганизмы, выделенные из мерзлотных почв [14].

Материалом для исследований послужили пробы почв, отобранные до биологической очистки (в июле) и пробы, отобранные через 3 месяца после очистки (в сентябре).

Как показано в ряде работ, для корректной оценки эффективности очистки почв необходимы исследования с привлечением целого комплекса методов анализа. Это позволяет выявить направленные изменения в составе нефтезагрязнения и выделить наиболее информативные показатели, свидетельствующие о процессах трансформации нефти в почве [6, 9, 11, 14–16]. К ним можно отнести уменьшение концентрации нефти с одновременным уменьшением доли углеводородов, увеличение смол и асфальтенов, перераспределение углеводородов в составе алканов и аренов и изменения в химической структуре почвенных экстрактов [9, 14, 16–18].

Содержание нефтепродуктов в почвах определяли методом холодной экстракции хлороформом по выходу экстракта. Для изучения процессов трансформации нефтяных углеводородов выделенные экстракты изучали с использованием комплекса физико-химических методов анализа. Структурно-групповой состав экстрактов изучали методом ИК-Фурье спектроскопии на спектрометре «Protege 460» фирмы «Nicolet» в диапазоне волновых чисел 500–4000 см⁻¹. Групповой компонентный состав (содержание углеводородных компонентов, спиртобензольных и бензольных смол, асфальтенов) определяли методом жидкостно-адсорбционной колонной хроматографии. Индивидуальный состав насыщенных углеводородов изучали методом хромато-масс-спектрометрии на системе, включающей газовый хроматограф Agilent 6890, имеющий интерфейс с высоко-

эффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Более подробно методики исследований приведены в работах [6, 9].

Повторность измерений трёхкратная. На рисунках и в таблицах приведены данные в виде средних арифметических значений. Полученные результаты в сравнении с контролем статистически достоверны. Значимость отличий от контроля определяли с помощью критерия Даннета для множественных сравнений при $p \leq 0,05$, $t > 3$.

Результаты и обсуждение

Содержание углеводородсодержащих компонентов в фоновой пробе почвы составило 348 мг/кг. Химический состав её отличается от типичных фоновых почв с территорий природных объектов, не находящихся под техногенным влиянием. Это выражается в повышенном содержании в групповом составе углеводородных компонентов (51% по сравнению с 4–20% для чистых почв), по появлению в спектре

полос поглощения (п.п.) характерных для ароматических циклов – 1600 см^{-1} и п.п. незамещённых атомов углерода в ароматических кольцах в области $600–1000 \text{ см}^{-1}$, что можно рассматривать как следы загрязнения нефтью (рис. 1а). Как правило, такой состав фоновых проб характерен для почв вблизи техногенных объектов, таких как нефтебазы [6, 19].

Исходное содержание нефти в объединённой пробе с опытного участка составило $34594 \pm 1037 \text{ мг/кг}$. По классификации В.М. Гольдберга такое содержание нефтепродуктов в почвах соответствует высокому уровню загрязнения [19]. Данный участок был пропитан вязкой нефтью в результате разлива, произошедшего более 10 лет назад. Данная проба характеризуется как «старое» загрязнение, подвергшееся глубокой деградации, на что указывают ИК-спектры, в которых одновременно присутствуют интенсивные п.п. карбонильных – 1700 см^{-1} , гидроксильных групп – 3300 см^{-1} и ароматических соединений – п.п. 1600 см^{-1} (рис. 1б)

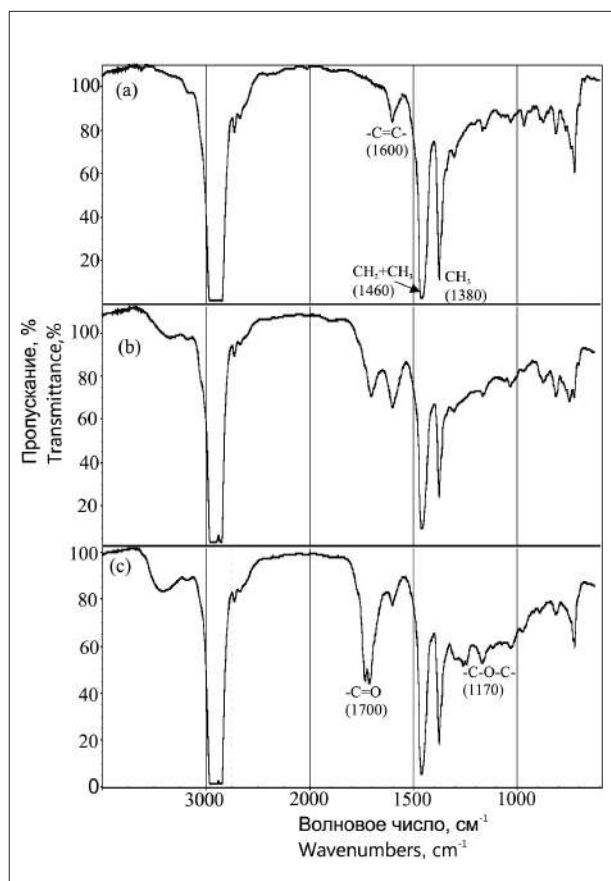


Рис. 1. ИК-спектры проб: нефти (а), почв с исходным «старым» нефтезагрязнением (б) и фоновой пробы почвы (с)

Fig. 1. IR-spectra of samples: oil (a), soil extract with the initial “old” oil pollution (b), and background soil (c)

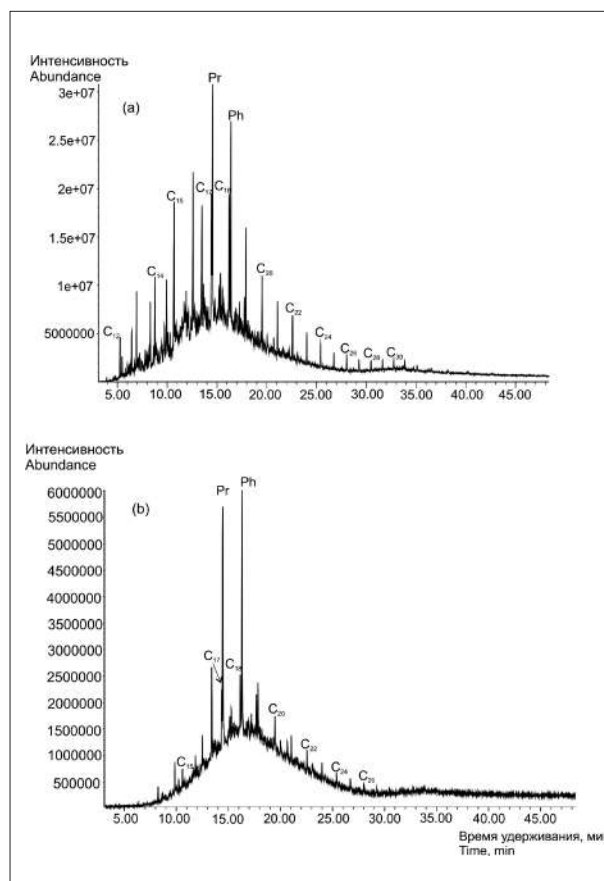


Рис. 2. Хроматограммы по общему ионному току насыщенных углеводородов: исходной пробы («старое» загрязнение) (а), через 3 месяца после биологической очистки (б)

Fig. 2. Chromatograms TIC of saturated hydrocarbons: initial “old” pollution (a), 3 months after treatment (b)

Характеристика состава проб почв
Characteristic of the soils samples composition

Параметры Parameters	Характеристика проб / Nature of the samples		
	нефть pollutant (oil sample)	исходное «старое» загрязнение / initial “old” pollution	через 3 месяца после очистки / 3 months after treatment
Содержание нефти, мг/кг Oil content, mg/kg	–	34600±1000	15000±450
Групповой компонентный состав экстрактов почв, % Group component composition, %			
Углеводороды / Hydrocarbons	87±4	64,9±3,2	50,5±2,5
Бензолные смолы / Benzol resins	6,0±0,3	5,5±0,3	14,5±0,7
Спиртобензолные смолы Alcohol-benzol resins	6,4±0,3	10,4±0,5	14,3±0,7
Асфальтены / Asphaltenes	0,5±0,1	19,2±0,9	20,6±1,0
Относительные коэффициенты поглощения кислородсодержащих групп и связей спирто-бензолных смол / The relative absorption coefficients of alcohol-benzene resins:			
Карбонильные группы Carbonyl groups D_{1700}/D_{1460} *	0,21±0,01	0,80±0,04	2,08±0,10
D_{1700}/D_{1600} **	0,82±0,04	2,34±0,12	3,35±0,17
Эфирные связи Ether bond D_{1170}/D_{1460}	–	0,41±0,02	0,71±0,04
Индивидуальный состав алкановых углеводородов Individual composition of alkane hydrocarbons			
$\Sigma n.k.-nC_{20}/\Sigma nC_{21}-k.k.$ $\Sigma b.b.t.-nC_{20}/\Sigma nC_{21}-e.b.t.***$	5,21±0,26	4,74±0,24	1,93±0,09
Изопреноиды/н-алканы Isoprenoids/n-alkanes	0,33±0,02	0,92±0,05	2,56±0,13
Pr/nC ₁₇	0,45±0,02	1,95±0,09	4,39±0,22
Ph/nC ₁₈	0,91±0,05	1,98±0,09	3,76±0,19
Pr+Ph/nC ₁₇ +nC ₁₈	0,63±0,03	1,96±0,09	4,04±0,21

Примечание: * D_{1460} – оптическая плотность п. п. длинных метиленовых групп, ** D_{1600} – оптическая плотность п. п. ароматических циклов, *** н.к. – температура начала кипения; к.к. – температура конца кипения. Достоверность средних арифметических значений по сравнению с контролем и фоном: $p < 0,05$, $t > 3$.

Note: * D_{1460} – optical density of the absorption of long methylene chains, ** D_{1600} – optical density of the absorption of aromatic cycles, *** b.b.t. – temperature of beginning boiling; e.b.t. – temperature of end boiling. Reliability of arithmetic mean values in comparison with control and background: $p < 0.05$, $t > 3$.

в отличие от спектра нефти, в котором присутствуют п.п. исключительно углеводородных структур (метиленовых и метильных групп, ароматических соединений) (рис. 1а). Таким образом, по характеру спектра почва со «старым» загрязнением имеет большое сходство со спектрами экстрактов почв, подвергшихся глубокой деградации нефтезагрязнения [9, 10].

Информацию о сроках давности загрязнения почв дают также данные группового компонентного состава. В исходной пробе количество углеводородов составило всего 65% (табл.). В отличие от «старого» загрязнения, характеристики загрязнений, связанных со

свежими разливами нефти, соответствуют загрязнителям, в данном случае нефти, групповой состав которой характеризуется преобладанием углеводородных компонентов над смолисто-асфальтовыми [21].

Эти два типа загрязнений отличаются и по распределению алкановых углеводородов, на что указывают различия в соотношениях: изопреноиды/н-алканы, относительно низкомолекулярных н-алканов к высокомолекулярным ($\Sigma n.k.-nC_{20}/\Sigma nC_{21}-k.k.$), пристана (Pr) над nC₁₇, фитана (Ph) над nC₁₈.

Многими исследователями соотношение н-алканов и изоалканов определяется сте-

пенью «старения» и выветривания нефтезагрязнения, в процессе которого первыми биологическому разложению подвергаются *n*-алканы [9–11]. В исходном загрязнении с давним сроком установлено увеличение соотношений Pr/nC₁₇, Ph/nC₁₈, что указывает на происходившие процессы биодegradации (табл., рис. 2а).

Установленные особенности в химическом составе почв в направлении уменьшения роли нефтяных углеводородов, изменении характера их распределения и увеличения количества кислородсодержащих соединений указывают на то, что с момента загрязнения почвы прошёл длительный период времени, и состав загрязнения изменился за счёт медленно протекающих в условиях криолитозоны процессов трансформации.

В работах российских и зарубежных учёных по исследованиям в арктических регионах показано, что нефтезагрязнение в таких условиях способно сохраняться на долгие годы. Основными факторами, влияющими на деградацию нефтяных углеводородов в условиях Арктики, являются: температурный режим, уровень залегания многолетнемерзлых пород, содержание органического вещества в почвах, влажность, биологическая активность почв, условия аэрации [8, 9, 13, 17].

В эксперименте по очистке почв со «старым» загрязнением с помощью микробного биопрепарата можно исключить такие факторы превращения нефтяных углеводородов, как сорбция-десорбция нефтяных компонентов, их растворение, испарение, образование эмульсий, вымывание атмосферными осадками, так как эти процессы, как правило, происходят в первый год после разлива нефти [10]. Поэтому в нашем эксперименте рассматривается процесс микробиологической деструкции нефтяного загрязнения под действием биопрепарата. За 3 месяца инкубации биопрепарата в почве остаточное содержание нефти уменьшилось, степень деструкции составила 56,6% (табл.). В составе загрязнения увеличилось содержание асфальтово-смолистых компонентов и уменьшилось углеводородов по сравнению с исходным загрязнением (табл.). О степени микробиологической деструкции можно судить по относительным коэффициентам поглощения кислородсодержащих групп и связей спиртобензольных смол. Через 3 месяца после очистки в 2,6 раза увеличился коэффициент поглощения карбонильных групп D_{1700}/D_{1460} и в 1,5 раза D_{1700}/D_{1600} , в 1,7 раза увеличилось содержание афирных групп и связей D_{1170}/D_{1460} (табл.).

Изменился состав алкановых углеводородов, что видно по перераспределению их гомологов. В результате уменьшилось количество *n*-алканов, а в их составе относительно низкомолекулярных гомологов (табл., рис. 2б). Содержание изопреноидов увеличилось в 1,3 раза, что отражает соотношение изопреноиды/*n*-алканы. В 2 раза увеличилось соотношение $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$, которое многими исследователями используется как коэффициент микробиологической деградации (табл.) [9, 14, 16, 21]. Установленное увеличение данного коэффициента в ряду: нефть (как загрязнитель) → исходное «старое» загрязнение → изменённое загрязнение через 3 месяца инкубации свидетельствует о деструкции наименее устойчивых к биодegradации *n*-алканов nC₁₇ и nC₁₈ и относительном накоплении более устойчивых изопреноидов Pr и Ph.

Заключение

В результате изучения трансформации нефтезагрязнения почв в арктической зоне Якутии по ряду аналитических параметров определён химический состав загрязнения с давним сроком и установлены особенности его трансформации во времени и под действием биопрепарата.

В опыте по обработке нефтезагрязнённых мерзлотных почв биопрепаратом степень деструкции загрязнения составила 56,6%, что позволяет рассматривать применение биологической очистки как один из эффективных способов восстановления почв в условиях Арктики. Вместе с тем результаты проведенного опыта показали, что однократной обработки биопрепаратом в условиях Арктики недостаточно для полного восстановления нарушенных почв, поскольку остаточный уровень загрязнения оставался достаточно высоким и составлял 15000 ± 450 мг/кг.

Эксперимент по биологической очистке нефтезагрязнённых почв на территории нефтебазы может быть использован при проведении восстановительных работ на других территориях арктической зоны. Полученные данные будут полезны для выявления основных факторов, влияющих на особенности процессов трансформации нефтяных углеводородов в мерзлотных почвах, скорость и направленность их протекания. Это имеет практическое значение для разработки оптимальных способов по рекультивации техногенно-нарушенных территорий в условиях Арктики, и, как следствие, сокращения затрат на её проведение.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № АААА-А21-121011490054-0 «Биогеохимия процессов формирования и разрушения углеводородных флюидов».

References

1. Diagnostic analysis of the environmental state of the Arctic zone of the Russian Federation. Moskva: Nauchchny Mir, 2011. 124 p. (in Russian).
2. Makhutov N.A., Lebedev M.P., Bolshakov A.M., Zakharova M.I., Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Chalaya O.N., Lifshits S.Kh. Forecast of emergencies at oil and gas facilities and elimination of consequences of emergency oil spills in arctic climate // Arctic: Ecology and Economy. 2016. No. 4 (24). P. 90–99 (in Russian). doi: 10.28999/2514-541X-2019-3-1-52-61
3. Patin S.A. Oil and continental shelf ecology. V. 1: Offshore oil and gas industry: actual situation, prospects, factors of impact. Moskva: Izdatelstvo VNIRO, 2017. 326 p. (in Russian).
4. Nemirovskaya I.A. Oil in the ocean (pollution and natural streams). Moskva: Nauchchny Mir, 2013. 432 p. (in Russian).
5. McClelland J.W., Dery S.J., Peterson B.J., Holmes R.M., Wood E.F. A pan-arctic evaluation of changes in river discharge during the latter half of the 20th century // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. No. 6. Article No. L06715. 4 p. doi: 10.1029/2006GL025753
6. Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Chalaya O.N., Lifshits S.Kh. The questions of environmental monitoring and rehabilitation of oil-contaminated soils of the Arctic zone of Yakutia // Arktika and North. 2012. No. 5. P. 97–108 (in Russian).
7. Filler D.M., Snape I., Barnes D.L. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in cold regions. Cambridge University Press, 2008. 273 p. doi: 10.1017/CBO9780511535956
8. Kachinskiy V.L., Zavgorodnyaya Yu.A., Gennadiev A.N. Hydrocarbon contamination of arctic tundra soils of the Bol'shoi Lyakhovskii Island (the Novosibirskie Islands) // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. No. 2. P. 57–69. doi: 10.1134/S1064229314020070
9. Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Lifshits S.Kh., Chalaya O.N. Transformation of oil-contaminated soils of cryolithozone // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. 2019. Special Issue 1. P. 26–36.
10. Oborin A.A., Khmurchik V.T., Ilarionov S.A., Markarova M.Yu., Nazarov A.V. Contaminated Biocenosis. Perm: Permskiy gosudarstvennyy universitet; Permskiy gosudarstvennyy tehnikeskii universitet, Ural'skoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 2008. 511 p. (in Russian).
11. Aislabie J., McLeod M., Fraser R. Potential for biodegradation of hydrocarbons in soil from the Ross Dependency, Antarctica // Applied Microbiology and Biotechnology. 1998. V. 49. No. 2. P. 210–214. doi: 10.1007/s002530051160
12. Kuznetsov F.M., Ilarionov S.A., Seredin V.V., Ilarionov S.Yu. Remediation of oil-contaminated soils. Perm: Perm State Technical University, 2000. 105 p. (in Russian).
13. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Prospects of using a consortium of Hydrocarbon-oxidizing microorganisms for cleaning oil-polluted soil of the extreme north // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 88–94 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-095-097
14. Shihranov O.G., Glyaznetsova Yu.S., Erofeevskaya L.A., Nikolaeva A.V. The procedures of bioremediation of oil-contaminated soils suitable for the climatic conditions of the far north and the assessment of their effectiveness // Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2015. No. 1 (17). P. 90–97 (in Russian).
15. Coulon F., Pelletier E., Gourhant L., Delille D. Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil // Chemosphere. 2005. V. 58. No. 10. P. 1439–1448. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.007
16. Jovancicevic B., Antic M., Pavlovic I., Vrvic M., Beskoski V., Kronimus A., Schwarzbauer J. Transformation of petroleum saturated hydrocarbons during soil bioremediation experiments // Water Air Soil Pollution. 2008. V. 190. No. 1–4. P. 299–307. doi: 10.1007/s11270-007-9601-z
17. Rogozina E.A., Andreeva O.A., Zharkova S.I., Martynova D.A. Comparative characteristics of native biopreparation proposed for the cleanup of soils and grounds from pollution // Neftegasovaa geologia. Teoria i praktika. 2010. V. 5. No. 3. [Internet resource] http://www.ngtp.ru/rub/7/37_2010.pdf (Accessed: 16.09.2019) (in Russian).
18. Margesin R., Schinner F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments // Applied Microbiology and Biotechnology. 2001. V. 56. No. 5–6. P. 650–663. doi: 10.1007/s002530100701
19. Goldberg V.M., Zverev V.P., Arbuzov A.I., Kazenov S.M., Kovalevskiy Yu.V., Putilina V.S. Technogenic pollution of natural waters by hydrocarbons and its ecological consequences. Moskva: Nauka, 2001. 93 p. (in Russian).
20. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Kovach R.G., Koshovskiy T.S., Khlynina N.I. Hydrocarbon status of soils under different ages of oil contamination // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. No. 5. P. 529–537. doi: 10.1134/S1064229316050045
21. Kashirtsev V.A. Geochemistry of the oils of the east of Siberian platform. Yakutsk: Yakutskiy nauchnyy centr Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2009. 180 p. (in Russian).

Оценка антропогенного загрязнения тяжёлыми металлами и мышьяком почв города Ухта (Республика Коми)

© 2021. Е. Ю. Кряжева¹, ст. преподаватель,
Е. М. Лаптева², к. б. н., доцент, зав. отделом почвоведения,
С. В. Денева², к. б. н., н. с., Ю. В. Холопов², к. б. н., н. с.,
Н. В. Бадулина², ведущий инженер-химик,
Г. Г. Осадчая¹, д. г. н., профессор,

¹Ухтинский государственный технический университет,
169300, Россия, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13,

²Институт биологии Федерального исследовательского центра
«Коми научный центр Уральского отделения РАН»,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: eremina_83@mail.ru

Исследованы почвы разных функциональных зон одного из промышленных городов Республики Коми – города Ухта. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой в верхних горизонтах почв определено содержание 14 тяжёлых металлов (ТМ) (Pb, Hg, Ba, Zn, Cd, Cu, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, Mo, V, Sr) и одного металлоида (As). Установлено, что общий уровень загрязнения поллютантами определяется совместным вкладом естественных и антропогенных факторов. Показано, что в почвах города по сравнению с почвами фоновых территорий повышено валовое содержание ТМ. В технозёмах промышленной зоны и в почвах рекреационной зоны (подзолы с урбаногенными признаками) суммарное загрязнение почв ТМ соответствует умеренно-опасному уровню. Отмечено возрастание подвижности ТМ в технозёмах и её снижение – в почвах рекреационной зоны относительно природного фона.

Ключевые слова: экологический мониторинг, городские почвы, тяжёлые металлы, загрязнение почв.

Assessment of anthropogenic pollution by heavy metals and arsenic in soils of Ukhta city (Komi Republic)

© 2021. E. Yu. Kryazheva¹ ORCID: 0000-0002-4826-9231[†]

E. M. Lapteva² ORCID: 0000-0002-9396-7979[†] N. V. Badulina² ORCID: 0000-0001-8388-4726[†]

S. V. Deneva² ORCID: 0000-0002-1813-7799[†] Yu. V. Kholopov² ORCID: 0000-0002-5725-746X[†]

G. G. Osadchaya¹ ORCID: 0000-0003-0323-5975[†]

¹Ukhta State Technical University,
13, Pervomayskaya St., Ukhta, Russia, 169300,

²Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: eremina_83@mail.ru

The soils of different functional zones of one of the industrial cities in the Komi Republic – the city of Ukhta – were studied. The total content and mobile forms of 14 heavy metals (HMs) (Pb, Hg, Ba, Zn, Cd, Cu, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, Mo, V, Sr) and 1 heavy metalloid (As) in the upper soil horizons were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. It is established that the relatively low overall level of their pollution is determined by the joint contribution of natural and anthropogenic factors. To assess the degree of health safety of city dwellers, the obtained data on the content of HMs in soils were compared with the existing sanitary-and-hygienic regulations of MAC and APC, as well as with their Clarke upper crust and in the soils of other cities. In terms of bulk composition, the priority soil pollutants include, first of all, Zn, and As. According to the degree of mobility, Zn and Mn in the Podzols Technic, and Ba and Pb in the Urbic Technosols of the industrial zone, are considered hazardous pollutants that easily migrate to adjacent environments and along food chains. To take into account regional features when assessing the degree of anthropogenic pollution of the studied soils, the data on the content of total and mobile forms of HMs were compared with their back-

ground concentrations. It is shown that in comparison with background soils, the total contents of HMs is increased in urban soils, especially in their urban counterparts (Podzols) and Urbic Technosols of industrial zone – the total pollution corresponds to a moderately dangerous level. An increase in the mobility of TM in Urbic Technosols of the city relative to the conventional background and its decrease in urban Podzols relative to the natural background is noted.

Keywords: environmental monitoring, urban soils, heavy metals, soil pollution.

Высокая степень техногенной нагрузки на современные урбоэкосистемы определяет важность изучения свойств и экологического состояния городских почв, играющих важную роль в аккумуляции и инактивации поллютантов техногенной природы [1]. В связи с этим особое внимание при исследовании городских почв уделяют определению уровня и характера их загрязнения тяжёлыми металлами (ТМ) [2, 3]. В настоящее время накоплен значительный массив данных о специфике формирования и характере антропогенной трансформации почв в городах, находящихся в различных физико-географических условиях, характеризующихся разной специализацией промышленного производства и разным уровнем техногенного воздействия на урбосреду. Интерес к данной проблеме одинаково высок как в России [4–6], так и за рубежом [7–9]. Однако в Республике Коми (РК), где 78,8% населения сосредоточено в городах, такие исследования единичны [5, 10].

Цель данной работы – выявить особенности распределения и концентрирования тяжёлых металлов в почвах города Ухта, оценить степень их антропогенного загрязнения.

Объекты и методы исследований

Для выявления специфики и закономерностей загрязнения почв г. Ухта, в августе 2017 г. проведён отбор проб почв в 22 точках наблюдений (т. н.), соответствующих разным функциональным зонам города: ПЗ (промышленная зона) – 7 т. н., ТЗ (транспортная) – 10 т. н., РЗ (рекреационная) – 5 т. н. Диагностику и идентификацию почв проводили в соответствии с таксономией городских почв [11] и системой мировой базы почвенных ресурсов [12]. Почвы отбирали методом конверта в соответствии с рекомендациями [13]. Анализировали смешанные образцы, составленные из 5 индивидуальных проб.

Образцы почв исследовали на содержание 11 тяжёлых металлов (Zn, Cd, Cu, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, Mo, V, Sr), трёх сверхтяжёлых (Pb, Hg, Ba) и одного тяжёлого металлоида (As). Содержание валовых и подвижных форм ТМ определяли в экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборах Spectro Cyros CCD и Spectro Arcos в соответствии с [14, 15]. Обменную кислотность (pH_{KCl}) почв определяли потенциометрически, содержание углерода органического ($C_{орг.}$) – методом И.В. Тюрина с фотометрическим окончанием.

С целью выявления особенностей и уровня загрязнения почв полученные данные о содержании ТМ в почвах г. Ухта сравнивали с их кларками в верхней части земной коры [16] и почвах городов [1], для оценки степени безопасности (опасности) для здоровья горожан – с существующими санитарно-гигиеническими нормативами ПДК и ОДК [17]. В качестве условного фона для искусственных почвоподобных тел, преобладающих в границах жилой застройки города (технозёмы, 17 т. н.), использовали данные о содержании ТМ в аналогичных по механическому составу искусственных почвах, расположенных в одном из парков г. Ухта, степень озеленения которого составляет более 70% (площадь парка 15,8 га). Природным фоном для наименее антропогенно изменённых почв города (подзолы иллювиально-железистые с урбаногенными признаками, 4 т. н.) послужили почвы сосняков беломошно-зеленомошных – подзолы иллювиально-железистые.

На основании полученных результатов рассчитывали коэффициенты концентрации элементов Kk_i (по формуле 1) и комплексный показатель суммарного загрязнения – $Z_{ст(г)}$ (по формуле 2), учитывающий среднее геометрическое коэффициентов Kk_i и токсичность ТМ [18]:

$$Kk_i = \frac{C_i}{C_{iфон}} \quad (1)$$

где Kk_i – коэффициент концентрации i -ого элемента в почве относительно фона; C_i – фактическое содержание i -ого элемента в почве; $C_{iфон}$ – фоновое содержание i -ого элемента в почве.

$$Z_{ст(г)} = n \cdot [(Kk_1 \cdot K_{T1}) \cdot (Kk_2 \cdot K_{T2}) \cdot \dots \cdot \dots \cdot (Kk_n \cdot K_{Tn})]^{1/n} - (n-1) \quad (2)$$

где $Kk_1 \dots Kk_n$ – коэффициент концентрации i -ого (от 1 до n) элемента относительно фона;

$K_{t_1} \dots K_{t_n}$ – коэффициент токсичности i -ого (от 1 до n) элемента с учётом его класса опасности.

Суммарное загрязнение почв ТМ оценивали в соответствии с предложенной градацией [18]. Статистический анализ полученных данных выполняли в программном пакете Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Город Ухта по численности населения относится к категории средних городов (на 01.01.2020 г. зарегистрировано 93716 человек). Основу его экономики составляют предприятия, занимающиеся транспортировкой нефти и газа, переработкой нефти, производством строительных материалов (щебень, кирпич, железобетонные изделия и др.) и металлических конструкций. На территории города почвенный покров представлен преимущественно маломощными технозёмами песчаного и супесчаного гранулометрического состава, подстилаемыми с глубины 10–20 см щебнисто-гравийным материалом [10]. Для технозёмов характерна нейтральная и слабощелочная реакция: медианное значение (\overline{Me}) показателя pH_{KCl} 7,27 ед., коэффициент вариации (V) – 5,8%. Содержание $C_{орг}$ варьирует от 0,45 до 14,2%. Наиболее богаты органическим веществом почвы газонов ТЗ, при благоустройстве которых вносили торф.

В границах РЗ г. Ухта встречаются антропогенно изменённые аналоги природных почв (подзолы иллювиально-железистые, пойменные почвы, глееподзолистые и др.) разной степени нарушенности. Наименее нарушены почвы парковых зон с участием *Pinus sylvestris* L. – подзолы иллювиально-железистые с урбаногенными признаками. В пределах парковой зоны города на них приходятся максимальные площади. Органогенные горизонты таких почв имеют реакцию среды от сильноокислой до слабоокислой (3,6–5,4 ед. рН) и высокое содержание $C_{орг}$ (от 12,8 до 24,1%). В минеральных горизонтах содержание $C_{орг}$ составляет 0,3% и менее, значения pH_{KCl} в подзолистом горизонте варьирует в пределах 3,0–3,5 ед. рН, что характерно для подзолов фоновых территорий [19]. Выделенные на территории РЗ условно фоновые почвы для технозёмов ТЗ и ПЗ имеют значения pH_{KCl} в пределах 5,7 ед. рН.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в почвах г. Ухта содержание большинства ТМ, для которых установлены нормативы ПДК и ОДК, находится

ниже их уровня или ниже предела обнаружения (табл. 1). С точки зрения санитарно-гигиенической безопасности к числу приоритетных загрязнителей в почвах г. Ухта следует отнести Zn и As. В среднем превышение нормативных показателей по валовому содержанию Zn в почвах РЗ составляет 5,5 ОДК, ПЗ – 1,5 ОДК, концентрация As в почвах ТЗ и ПЗ находится на уровне 1,5–1,6 ПДК. В единичных т. н. ТЗ и ПЗ (технозёмы) отмечено превышение нормативных показателей для Ni на уровне 1,4–1,6 ОДК, Pb – 1,7 ОДК, что свидетельствует о наличии локальных источников загрязнения данными ТМ. По содержанию подвижных форм ТМ приоритетными поллютантами являются Mn и Zn. В почвах РЗ их концентрация в среднем была на уровне 1,9 ПДК_{Mn} и 5,8 ПДК_{Zn}. В почвах ТЗ и ПЗ содержание подвижных форм Mn и Zn находится в пределах 1 ПДК, однако в единичных пробах оно достигает 1,1–1,5 ПДК_{Mn} и 2,4–2,5 ПДК_{Zn}. В некоторых образцах также было выявлено повышенное содержание Pb, превышающее ПДК в 1,2–4,0 раза.

В почвах РЗ г. Ухта глобальный геохимический фон (ГГХФ) [16] превышен по содержанию Cd в среднем в 3 раза, в отдельных т. н. отмечено превышение ГГХФ по содержанию Zn (в 1,7–13,3 раза) и Hg (в 1,1–1,4 раза), в одной пробе содержание Ba находилось на уровне ГГХФ. Для технозёмов выявлено превышение ГГХФ для Cd в среднем в 2,7 (ТЗ) – 3,4 (ПЗ) раза, в нескольких т. н. – для Zn (в 1,1–2,6 раза) и Pb (1,2–3,2 раза), в одной пробе концентрация Cu была на уровне ГГХФ.

Сравнение полученных нами данных с кларками ТМ, установленными для почв городов с численностью населения менее 100 тыс. человек [1], выявило превышение в некоторых образцах почв, отобранных на территории РЗ г. Ухта, содержания Zn (в 1,4–10,8 раза) и Mn (в 1,4 раза). Для технозёмов ТЗ и ПЗ в трёх пробах отмечено превышение содержания Zn (в 1,0–2,2 раза), в двух пробах – Ni (в 1,5–1,7 раза), в одной пробе – Pb (в 1,4 раза).

Как для валовых, так и для подвижных форм ТМ выявлено значительное пространственное варьирование их концентраций в почвах г. Ухта (табл. 1). Почвы функциональных зон города имеют определённые отличия по этим показателям, что может быть обусловлено характером антропогенного (техногенного) воздействия. В частности, в РЗ наиболее неоднородны почвы по содержанию Zn, Ba (валовые и подвижные формы) и Fe (подвижные

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почвах города Ухта (мг/кг) / The content of heavy metals and arsenic in the soils of the Ukhta city (mg/kg)

Элемент Element	Форма Fractions	Технозоёмы (0–10 см) Urbic Technosols (0–10 cm)		Подзолы с урбаногенными признаками (горизонт O) Podzols Technic (horizon O)		ПДК / ОДК MAC / APC	Кларк в.ч.з.к. Clarke upper crust	Кларк городских почв*** Clark urban soils***	Условный фон (0–10 см) Conditional background (0–10 cm)	Природный фон (горизонт O) Natural background (horizon O)
		$\bar{X} \pm \Delta$ мг/кг / mg/kg	V / CV %	$\bar{X} \pm \Delta$ мг/кг / mg/kg	V / CV %					
Zn	1	61±20	71,8	301±745	155,7	55 (220)*	75	92,4	30,4	22,73
	2	15±7	100,4	134±357	167,0	23**	–	–	4,9	8,23
Cd	1	0,28±0,04	30,1	0,27±0,14	34,1	0,5 (2)	0,09	1,4	0,26	0,13
	2	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	–	–	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD
Cu	1	13,5±2,9	45,2	7±4	32,5	33 (132)	27	28,2	5,14	2,73
	2	0,8±0,3	80,9	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD	3	–	–	0,4	< ПО / < LOD
Co	1	3,2±0,3	22,2	1,4±0,6	27,9	–	15	14,6	2,42	0,39
	2	0,57±0,08	30,6	0,25±0,18	45,5	5	–	–	0,4	0,08
Ni	1	14,3±2,6	38,2	4,7±2,5	33,5	20 (80)	50	18,4	8,68	2,48
	2	0,80±0,25	67,2	0,4±0,11	16,9	4	–	–	0,4	0,19
Fe	1	9751 ± 1658	36,4	3400±1330	24,6	–	40600	26570	8780	1502,5
	2	76±51	144,9	14±17	76,8	–	–	–	16,5	15,1
Mn	1	237±32	28,8	370±312	53,0	1500	770	457,5	372	243,5
	2	93±12	27,3	191,75±146	47,9	100	–	–	93	117,25
Cr	1	11,5±1,6	29,5	5,83±3	36,4	–	92	81,5	7,3	3,83
	2	0,31±0,08	56,9	0,17±0,04	15,1	–	–	–	0,2	0,12
Mo	1	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	1,1	2,6	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD
	2	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	–	–	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD
V	1	17,1±2,1	26,3	10,43 ± 3	19,6	150	106	104,1	19,6	4,95
	2	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	–	–	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD
Sr	1	43,3±9	42,4	18,25 ± 8	27,3	–	270	324,5	12,2	7,65
	2	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	–	–	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD
Pb	1	13±5	88,2	13,5±2,8	12,8	32 (130)	17	39,5	6	9,7
	2	4,0±2,6	140	4,5±2,9	40,7	6	–	–	0,66	3,88
Hg	1	0,03±0,01	80,8	0,07±0,02	20,2	2,1	0,065	0,88	0,02	0,04
	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ba	1	62±17	59,7	275±436	99,8	–	628	980,4	42,6	34,5
	2	19±3	35,8	30,5±37,0	76,5	–	–	–	16,1	12,6
As	1	3,2±0,4	25,2	0,95±0,30	21,9	2 (10)	5,6	15,0	2,58	0,44
	2	< ПО / < LOD		< ПО / < LOD		–	–	–	< ПО / < LOD	< ПО / < LOD

Примечание: 1 – валовые формы; 2 – подвижные формы; $\bar{X} \pm \Delta$ – средние арифметическое ± доверительный интервал для $P = 0,95$; V – коэффициент вариации; < ПО – ниже предела обнаружения; * ориентировочно допустимые концентрации элементов для песчаных почв (для суглинистых почв с нейтральной реакцией среды) [16]; ** предельно допустимые концентрации элементов для почв [17]; «–» – данные отсутствуют; Кларк в.ч.з.к. – Кларк верхней части земной коры [14]; *** для городов с населением менее 100 тыс. человек [15] / Note: 1 – gross forms; 2 – movable forms; $\bar{X} \pm \Delta$ – arithmetic mean for the sample ± confidence interval for $P = 0,95$; CV – the coefficient of variation; < LOD – lower limit of detection; * approximate permissible concentrations of elements for sandy soils (for loamy soils with a neutral reaction) [16]; ** maximum allowed concentrations of elements for soil [17]; “–” – indicates no data; Clarke upper crust [14]; *** for towns with a population of less than 100 thousand [15].

формы), почвы ТЗ и ПЗ – по содержанию Pb, Hg, Zn (валовые формы) и Fe, Pb, Zn, Cu (подвижные формы). Более однородным распределением валового содержания в почвах РЗ характеризуются Pb и V, подвижных форм – Ni и Cr, в технозёмах ТЗ и ПЗ – As, Co, V (валовые формы) и Mn (подвижные формы).

Большинство ТМ аккумулируется в почвах ТЗ и ПЗ (табл. 2). Исключением являются такие элементы, как Zn, Mn, Ba и Hg, валовое содержание которых выше в почвах РЗ. Это может быть обусловлено как геохимическими особенностями района исследования, для которого характерно повышенное содержание в почвах Mn (до 1100 мг/кг) и Hg (до 0,3 и более мг/кг) [19, 20], так и возможным поступлением ТМ от имеющихся локальных источников загрязнения.

Почвенный покров г. Ухта характеризуется разной степенью подвижности ТМ. В технозёмах ПЗ отмечена высокая доля подвижных форм Mn (24–53%), Ba (15–42%), Pb (13–95%), Co (17–24%) относительно их валового содержания. В подзолах иллювиально-железистых, приуроченных к территориям городских лесных массивов, наблюдается обратная тенденция – снижение подвижности таких элементов, как Ba (в 3,6 раза), Fe (в 2,7 раза), Pb (в 1,4 раза) и Co (в 1,4 раза) по сравнению с фоновыми почвами. Это может быть обусловлено менее кислой реакцией сре-

ды в почвах городских парков по сравнению с природными почвами: величина рН в них в среднем выше на 1,2–1,4 ед. Значительная подвижность ТМ в почвах ПЗ по сравнению с аналогичными почвами других функциональных зон города связана с повышенной техногенной нагрузкой, а также с их низкой буферностью (содержание органического вещества в них в среднем в 1,8 раза ниже по сравнению с почвами ТЗ).

В почвах РЗ валовое содержание ТМ выше по сравнению с почвами фоновых территорий – значение Kk_i (медиана) варьирует для отдельных элементов от 1,4 до 5,7. Самые высокие значения Kk_i отмечены для Ba, Zn, Co и Sr, самые низкие – для Pb, Mn и Cr. Показатели Kk_i , рассчитанные для технозёмов, ниже – они варьируют от 0,6 до 3,5. В технозёмах валовое содержание таких элементов, как Cd, V и Mn, не превышает соответствующие показатели условно фоновых почв, в то время как для таких элементов, как Sr и Cu получены максимальные значения Kk_i (3,5 и 2,5 соответственно). Содержание подвижных форм ТМ также превышает фоновые показатели, только концентрации Fe и Pb (в подзолах городских парков) и Mn (в насыпных грунтах ТЗ и ПЗ) ниже фоновых значений. Максимальные значения Kk_i отмечены в почвах РЗ для Zn (3,5) и Co (2,5), в ТЗ и ПЗ – для Pb (2,6), Fe (2,3) и Zn (2,0).

Таблица 2 / Table 2

Валовое содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почвах различных функциональных зон города Ухта, ($\bar{X} \pm \Delta$) мг/кг
The gross content of heavy metals and arsenic in the soils of various functional zones of Ukhta city, ($\bar{X} \pm \Delta$) mg/kg

Элемент Element	Функциональная зона города / Functional zone of city		
	транспортная зона transport zone	промышленная зона industrial zone	рекреационная зона recreational zone
Fe	9144±1083	10829±5373	3400±1330
Mn	233±43	226±68	370±312
Zn	51±13	83±62	301±745
Ba	49±7	87±51	275±436
Sr	46±6	50±23	18±8
Cu	13±3	16±8	7±3
Pb	8,7±2,2	20±16	13,5±2,8
Ni	15±4	14±5	4,7±2,5
Cr	11,3±2,3	12±4	6±3
V	15,4±1,8	18±6	10±3
Co	3,1±0,4	3,2±0,8	1,4±0,6
As	3,5±0,6	3,1±0,7	1,0±0,3
Cd	0,25±0,03	0,31±0,12	0,27±0,14
Hg	0,02±0,01	0,04±0,03	0,07±0,02

Примечание: $\bar{X} \pm \Delta$ – среднее арифметическое ± доверительный интервал для $P = 0,95$.

Note: $\bar{X} \pm \Delta$ – arithmetic mean for the sample ± confidence interval for $P = 0.95$.

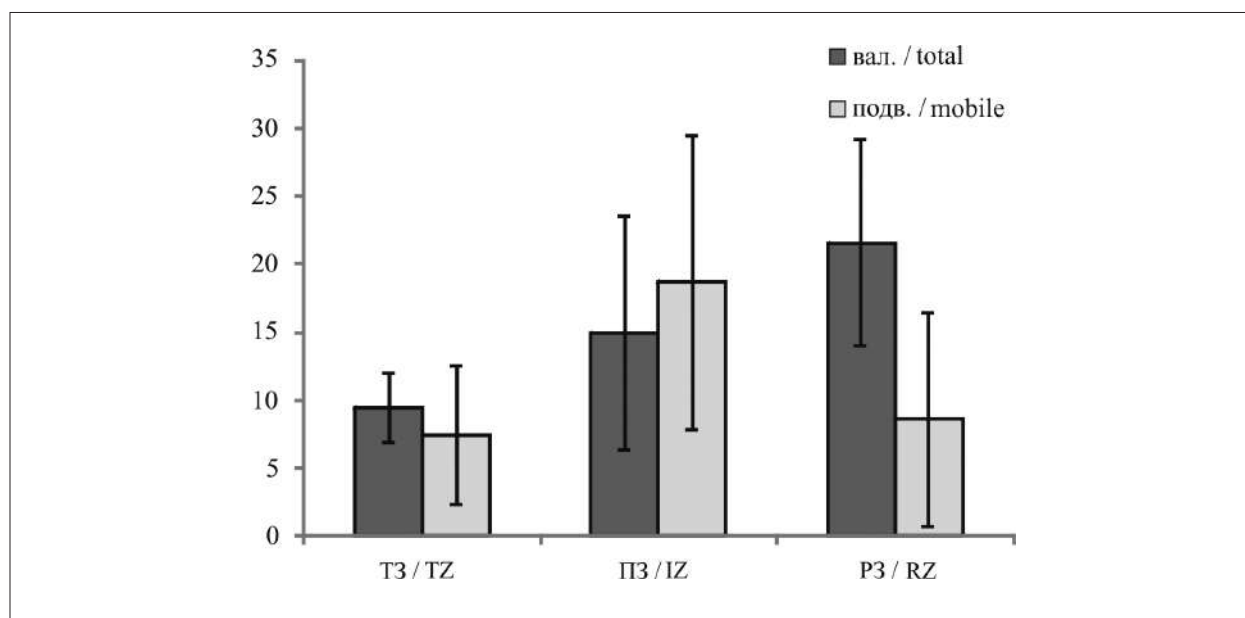


Рис. Комплексный показатель загрязнения почв $Z_{ct(g)}$ тяжёлыми металлами, рассчитанный по валовому содержанию ($Z_{ct(g) \text{ вал.}}$) и по содержанию подвижных форм ($Z_{ct(g) \text{ подв.}}$) для верхнего горизонта (0–10 см, O) почв разных функциональных зон г. Ухта: ТЗ – транспортная, ПЗ – промышленная, РЗ – рекреационная. Планками погрешности показано стандартное квадратичное отклонение для $P = 0,95$

Fig. The ecological index of the total contamination of soil by heavy metals $Z_{ct(g)}$, calculated from the total content ($Z_{ct(g) \text{ total}}$) and by the content of mobile forms ($Z_{ct(g) \text{ mobile}}$) for the upper horizon (0–10 cm, O) of soils of different functional zones of Ukhta city: TZ – transport zone, IZ – industrial zone, RZ – recreation zone. The error bar indicates the boundaries of the standard square deviation for $P = 0.95$

Расчёт комплексного показателя суммарного загрязнения почв ТМ (рис.) свидетельствует о том, что все исследованные грунты ТЗ относятся к категории не опасно загрязнённых: $Z_{ct(r)}$, рассчитанный по данным валового содержания, равен $9,5 \pm 1,8$, по содержанию подвижных форм – 6 ± 4 . Состояние технозёмов ПЗ соответствует умеренно-опасному уровню загрязнения: $Z_{ct(r)}$ соответственно 19 ± 8 и 21 ± 10 . Почвы РЗ занимают своеобразное положение в этом ряду: по содержанию валовых форм ТМ они попадают в категорию умеренно-опасных ($Z_{ct(r)} = 21 \pm 12$), подвижных форм ТМ – не опасного загрязнения ($Z_{ct(r)} = 6 \pm 13$). Для сравнения, в одном из промышленных городов Республики Коми – г. Воркута, в котором техногенная нагрузка на урбосреду связана с угледобычей, аэротехногенным воздействием продуктов горения терриконов, производством цемента и работой ТЭЦ, верхние горизонты почв в пределах городской черты относятся к опасной и чрезвычайно опасной категории земель [5].

Заключение

Впервые проведено исследование уровня и особенностей загрязнения тяжёлыми металлами почв одного из промышленных городов

Республики Коми – г. Ухта. Установлено, что для г. Ухта характерен относительно невысокий уровень загрязнения почв отдельными ТМ. Их содержание отличается пространственной неоднородностью распределения, что указывает на локальный характер загрязнения. Расчёт коэффициентов концентрации элементов свидетельствует о существенном вкладе антропогенного (техногенного) фактора в общий уровень содержания ТМ в почвах города. В верхних горизонтах почв рекреационной зоны (подзолы иллювиально-железистые с урбаногенными признаками) интенсивно аккумулируются Ba, Zn, Co и Sr, в технозёмах транспортной зоны – Sr и Cu, промышленной зоны – Sr, Cu, Ba и Pb. В почвах рекреационной зоны тенденция к аккумуляции некоторых элементов (Ba, Co, Fe) может быть обусловлена снижением их подвижности в результате нейтрализации кислотности почв в условиях урбосреды.

Приоритетными загрязнителями почв города Ухта, с точки зрения санитарно-гигиенической безопасности, являются в первую очередь Zn и As. К числу опасных поллютантов, легко мигрирующих в сопредельные среды и поступающих в трофические цепи [21], целесообразно отнести в рекреационной зоне города Zn и Mn, в промышленной зоне – Mn, Ba и Pb, в транспортной зоне – Mn и Ba.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (AAAA-A17-117122290011-5).

References

1. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. Chemical elements in urban soils. Moskva: Logos, 2014. 312 p. (in Russian).
2. Vodyanitskiy Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T. Soil contamination with heavy metals. Moskva: Moscow State University, 2012. 304 p. (in Russian).
3. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the accumulation of heavy metals and metalloids at geochemical barriers in urban soils // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. No. 5. P. 476–492. doi: 10.1134/S1064229315050038
4. Ladonin D.V., Mikhaylova A.P. Heavy metals and arsenic in soils and street dust of the Southeastern administrative district of Moscow: Long-Term Data // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. No 11. P. 1635–1644. doi: 10.1134/S1064229320110095
5. Dymov A.A., Kaverin D.A., Gabov D.N. Properties of soils and soil-like bodies in the Vorkuta Area // Eurasian Soil Science. 2013. V. 46. No. 2. P. 217–224. doi: 10.1134/S1064229313020038
6. Trifonova T.A., Podolets A.A., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podolets A.A. Assessment of soil pollution in recreational areas of an industrial city with compounds of heavy metals and arsenic // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 94–101. doi: 10.25750/1995-4304-2018-2-094-101/1
7. Van De Vijver E., Delbecque N., Verdoodt A., Seuntjens P. Estimating the urban soil information gap using exhaustive land cover data: the example of Flanders, Belgium // Geoderma. 2020. V. 372. Article No. 114371. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114371
8. Hulisz P., Charzyński P., Greinert A. Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Toruń and Zielona Góra // Soils Sediments. 2018. V. 18. P. 358–372. doi: 10.1007/s11368-016-1596-x
9. Schad P. Technosols in the world reference base for soil resources – history and definitions // Soil Science and Plant Nutrition. 2018. V. 64. No. 2. P. 138–144. doi: 10.1080/00380768.2018.1432973
10. Kryazheva E.Yu., Lapteva E.M., Perminova E.M., Zakharov N.E. Catalase activity of soils in industrial cities of the North (on the example of Ukhta in the Komi Republic) // Problems of Regional Ecology. 2020. No. 2. P. 115–121 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2020-12115
11. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Bakhmatova K.A., Matinyan N.N., Gol'eva A.A., Zharikova E.A., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. No. 10. P. 959–967. doi: 10.1134/S1064229314100093
12. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
13. Fedorets N.G., Medvedeva M.V. Methodology for the study of soils in urbanized areas. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the RAS, 2009. 84 p. (in Russian).
14. PND F 16.1:2.3:3.11-98. Quantitative chemical analysis of soils. Method for measuring the content of metals in solid objects by inductively coupled plasma spectrometry. Enter 25-06-1998. [Internet resource] <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293777/4293777593> (Accessed: 05.04.2020) (in Russian).
15. PND F16.1:2.3:3.50-08. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the mass fractions of mobile forms of metals (zinc, copper, nickel, manganese, lead, cadmium, chromium, iron, aluminum, titanium, cobalt, arsenic, vanadium) in soils, waste, composts, cakes, wastewater sludge atomic emission method with atomization in inductively coupled argon plasma. Moskva, 2008. 16 p.
16. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry // Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. 2015. No. 2. P. 7–17 (in Russian).
17. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (Accessed: 01.03.2021) (in Russian).
18. Vodyanitskiy Yu.N. Equations for assessing the total contamination of soils with heavy metals and metalloids // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. No. 10. P. 1184–1188. doi: 10.1134/S106422931010011X
19. Atlas of soils of the Komi Republic / Ed. G.V. Dobrovolsky. Syktyvkar, 2010. 356 p. (in Russian).
20. Vasilevich R.S., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Mercury in environmental objects of background and technogenic territories // News of higher educational institutions. Oil and Gas. 2009. No. 3. P. 116–122 (in Russian).
21. Ghrefat H.A., Yusuf N., Jamarh A., Nazzal J. Fractionation and risk assessment of heavy metals in soil samples collected along Zerqa River, Jordan // Environmental Earth Sciences. 2012. V. 66. P. 199–208. doi: 10.1007/s12665-011-1222-6

**Экологизация сельскохозяйственной науки и производства –
сельскохозяйственная экология – сельскохозяйственная экология
(в свете научного наследия Н. Ф. Реймерса)**

© 2021. А. В. Каверин, к. г. н., д. с.-х. н., профессор, зав. кафедрой,
А. В. Кирюшин, к. г. н., доцент,
Д. А. Массеров, к. э. н., доцент,
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
430005, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68,
e-mail: kaverinav@yandex.ru, kir_av@mail.ru, masserow@yandex.ru

В статье обосновывается актуальность повышения экологического профессионализма при ведении сельского хозяйства. Доминанта экологических проблем в аграрной отрасли авторам видится в следующем: экстенсивное ведение сельского хозяйства – земледелия и скотоводства – повсюду в мире ведёт к опустыниванию; интенсивное же ведение вызывает острые экологические коллизии, связанные с загрязнением почв, вод и воздуха, ухудшением качества продукции и т. д. Приводятся предложения видного отечественного теоретика экологической науки Н.Ф. Реймерса по экологизации сельскохозяйственной науки и практики. Рассмотрена важность изучения естественно-научных фундаментальных экологических основ ведения сельского хозяйства – законов, правил и принципов агроэкологии, определяющих «правила поведения» в сельскохозяйственном природопользовании. Указывается на острую необходимость в новых методологических, методических и чисто практических подходах к решению экологических проблем сельского хозяйства. В качестве нового, экологически ориентированного мировоззрения в сельскохозяйственной науке предлагается интегративная дисциплина экология – наука об эколого-экономических системах. К числу основных направлений сельскохозяйственной экологии относится экологизация планирования и управления аграрным природопользованием. Также приведены результаты экологических исследований и практические рекомендации по эколого-экономической оптимизации структуры сельскохозяйственных земель в Республике Мордовии за последние 28 лет.

Ключевые слова: сельскохозяйственная экология, сельскохозяйственная экология, сельскохозяйственное землепользование, экологическая теория, экологизация.

**Ecologization of agricultural science and production –
agricultural ecology – agricultural ecology
(in the light of the scientific heritage of N. F. Reymers)**

© 2021. А. В. Каверин ORCID: 0000-0001-8579-1371^{*}
А. В. Кирюшин ORCID: 0000-0001-7999-5669^{*}
Д. А. Массеров ORCID: 0000-0002-5076-2818^{*}
Ogarev Mordovia State University,
68, Bolshevistskaya St., Saransk, Republic of Mordovia, Russia, 430005,
e-mail: kaverinav@yandex.ru

The article substantiates the relevance of improvement of ecological professionalism in agriculture. The authors see the following dominant environmental problems in the agricultural sector: extensive agriculture (arable farming and cattle breeding) everywhere in the world leads to desertification; intensive management causes acute environmental conflicts associated with pollution of soil, water and air, deterioration of the quality of products, etc. The proposals of a prominent Russian theorist of environmental science N.F. Reimers on the greening of agricultural science and practice are given. The importance of studying natural-scientific fundamental ecological bases of conducting agriculture – the laws, rules and principles of agroecology defining “rules of behavior” in agricultural environmental management – by students of agricultural specialties is considered. It is pointed out that there is an urgent need for new approaches to solving environmental problems of agriculture. As a new, ecologically oriented worldview in agricultural science the integrative discipline economic ecology (the science of ecological and economic systems) is offered. The ecologization of planning and control of agricultural environmental management is one of the main directions of agricultural economic ecology. The results of economic and environmental studies and practical recommendations for environmental and economic optimization of the structure of agricultural lands in the Republic of Mordovia over the past 28 years are presented.

Keywords: agricultural ecology, agricultural economic environment, agricultural land use, ecological theory, ecologization.

Понятие «экологизация» вошло в лексикон экономистов, инженеров, педагогов и политиков в конце XX в. Семантика этого понятия широкая. Впервые о процессе экологизации в мировом масштабе было сказано на Конференции ООН в Стокгольме в 1972 г., а затем на Конференции «Рио-92» было особо отмечено, что «актуальность обеспечения устойчивого развития ставит на повестку дня необходимость глубокой «экологизации» экономики, в основе которой лежит реализация едва ли не главного приоритета – повышения ценности природы и её ресурсов, а также человека, его жизни и здоровья» [1]. На сегодняшний день данное определение получило множество толкований: экологизация знаний, науки, производства, техники и т. п. [2].

Есть множество оснований согласиться с тем, что в экологизации нуждается современное сельское хозяйство. Доминанта экологических проблем в аграрной отрасли видится в следующем [3–7]:

- экстенсивное ведение сельского хозяйства – земледелия и скотоводства – повсюду в мире ведёт к опустыниванию;

- интенсивное же ведение вызывает острые экологические коллизии, связанные с загрязнением почв, вод и воздуха, ухудшением качества сельскохозяйственной продукции и т. д.

Целью работы является обоснование важности изучения естественно-научных фундаментальных экологических основ ведения сельского хозяйства – законов, правил и принципов агроэкологии, определяющих «правила поведения» в сельскохозяйственном природопользовании, а также острой необходимости в новых методологических, методических и чисто практических подходах к решению экологических проблем сельского хозяйства.

Выдающийся теоретик отечественной экологической науки, Н.Ф. Реймерс, вслед за великим американским коллегой Ю. Одумом [8–10], суть нынешних и, вероятно, будущих проблем сельского хозяйства, просто и ясно пояснял тем, что в своей сельскохозяйственной деятельности человек вступает в острейшее противоречие с природой и получается, что «у природы и человека противоположные цели развития и стратегия их достижения. Природные системы всегда стремятся к максимуму разнообразия (в том числе и самих систем), наивысшей в данных условиях биомассе и минимуму биологической продуктивности, а человек пытается при минимуме разнообразия получить максимум продукции,

иными словами, наивысший урожай» [8]. Это и вызывает широкий круг эколого-социально-экономических проблем.

Комментируя такого рода проблемы применительно к российской действительности, Н.Ф. Реймерс в своих критических научных выступлениях [5–7] убедительно предупреждал, что такое положение ненормально. Выход из этой кризисной ситуации, в которую угодила аграрная отрасль, Н.Ф. Реймерс видел в экологизации, т. е. внедрении экологических идей в сельскохозяйственную науку и практику [11]. Он настойчиво призывал к утверждению нового мировоззрения у аграриев, которое должно быть экологически ориентированным. Проведя критический анализ экологических, экономических и социальных ущербов от нерационального аграрного природопользования в нашей стране, Н.Ф. Реймерс останавливается на необходимости вести сельское хозяйство не вопреки, а в соответствии с комплексом фундаментальных естественно-исторических законов, правил и принципов.

Выясняя причины сложившейся ситуации, Н.Ф. Реймерс ещё 30 лет тому назад отмечал: «Как это не странно, сельскохозяйственная экология в нашей стране «исчезла» как наука. Отечественных учебников по сельхоз-экологии нет, да и переведённые с иностранных языков относятся в основном к 60-м годам XX века. Отдельные вопросы, близкие к экологии сельского хозяйства, исследованы и освещены в специальной литературе. Но стройной системы знаний не создано. Нет в стране и научного центра соответствующего профиля. А без него частные отраслевые разработки, не имеющие фундаментальной основы, сталкиваются с множеством непредвиденных затруднений и поэтому обычно малоуспешны. Существуют как бы отдельные воинские части без единого штаба главнокомандующего» [5, с. 374].

За последние 30 лет положение начало меняться, но медленно и малозначительно. Отрадно то, что издано несколько отечественных учебников и учебных пособий по агроэкологии. Отдельные из них [12, 13], полностью проникнуты идеями Н.Ф. Реймерса и включают рассмотрение основных постулатов агроэкологической аксиоматики. В большинстве же других имя Реймерса либо не упоминается совсем, либо приводятся только его отдельные труды в списке использованной литературы. Но более всего удручает то, что и в новых учебниках очень слабо представлены (или не представлены совсем)

никакая наука невозможна, а профессионалов можно готовить лишь в профессиональных коллективах [5]. Отрадно, что в конце 1990-х гг. в Нижегородской и Московской сельскохозяйственных академиях, в Воронежском и Саратовском аграрных университетах ведётся подготовка специалистов по направлению «Агроэкология». Однако, приходится с горечью констатировать, что в нашей стране так и не создано единого вневедомственного, всесоюзного научного центра сельскохозяйственной экологии, учёные и сотрудники которого бы продолжали великую линию, начертанную В.В. Докучаевым, В.И. Вернадским, В.Н. Сукачёвым и Н.Ф. Реймерсом на экологическую оптимизацию всего сельского хозяйства, всей сельской жизни. В связи с рассмотренными недостатками, остаётся констатировать, что передовой опыт, научные предложения по экологизации сельского хозяйства, к сожалению, пока не находят широкого применения в нашей стране.

В то же время, «идеальный» механизм экологизации сельского хозяйства, который можно было бы перенести на российскую почву, разработан в Швеции и Финляндии [22–24]. В этих странах осуществляется государственная поддержка экологических ферм. Она обусловлена, главным образом, расширением спроса у населения на экологически чистые продукты через осознание их благоприятности как для здоровья потребителей, так и природной среды их обитания. Так, например, в Швеции государственные органы управления сельским хозяйством и охраны окружающей среды оказывает институциональную и финансовую поддержку «органическому» сельскому хозяйству, которое исключает использование ядохимикатов и минеральных удобрений [3]. Значительные успехи в экологизации сельского хозяйства отмечены в Австрии, Германии, Японии и ряде других стран [25–32].

В нашей стране также предпринимались успешные шаги по пути научного поиска альтернатив разрушающему природную среду традиционного земледелия в сельском хозяйстве. В качестве передовых исследований в этой области за последние три десятилетия можно выделить научно-исследовательскую работу по ландшафтному земледелию и землеустройству учёных кафедры организации территорий Воронежского аграрного университета. Начало данной экологической политике положил доктор экономических наук профессор М.И. Лопырёв [33]. Его

опыт, основанный на эколого-экономической оптимизации аграрных ландшафтов и биологизации земледелия, нашёл практическое применение в Воронежской области и Чувашской Республике [13].

Таким образом, научно-исследовательская деятельность по созданию экологически устойчивых агроландшафтов и сохранения в них естественного плодородия почв формирует основы нового предмета – агроландшафтной экологии, как одной из составных частей сельскохозяйственной экологии.

Заключение

В заключение приводим обобщения по экологизации сельскохозяйственной науки и производства с учётом умозаключений, представленных в трудах Н.Ф. Реймерса [5, 6] и других учёных [34, 35]:

- экологически оптимальное размещение полей при их соответствующем естественном окружении (оптимальная лесистость, луговистость, болотистость и т. п.), сохраняющее экологический баланс и автоматически увеличивающее продуктивность пашни;

- экологически обусловленные размеры полей и их конфигурация (выбор оптимального размера поля обеспечивает почвенную однородность обрабатываемого пахотного контура и положительно влияет на урожайность);

- использование агротехники с учётом географического и топографического места и условий произрастания, районирование сортов, реализация всех преимуществ селекции;

- внесение удобрений с учётом правила «всё или ничего», т. е. в оптимальных количествах (меньшее их внесение просто не даст никакого эффекта и потому бесполезно).

Все эти мероприятия конкретны и научно обоснованы для каждой территории, а ряд из них – даже для каждого рассматриваемого года. Это означает, что первоочередной задачей является необходимость повышения экологического профессионализма при ведении сельского хозяйства.

References

1. Bobylev S.N. Economics and ecology in University education // Na puti k ustoychivomu razvitiyu Rossii. 2006. No. 33. P. 41–43 (in Russian).
2. Rejmers N.F. Nature management: Dictionary-reference. Moskva: Mysl', 1990. 637 p. (in Russian).
3. Kaverin A.V. Environmental aspects of the use of agrosresource potential (based on the concept of agricultural

- economy). Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 1996. 220 p. (in Russian).
4. Kaverin A.V. Ecological basis of agriculture: Textbook. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2001. 36 p. (in Russian).
 5. Reimers N.F. Ecological basis of agricultural nature management // Sel'skokhozyaystvennaya praktika: protivorechiya perestroyki. Moskva: Agropromizdat, 1989. P. 350–373 (in Russian).
 6. Reimers N.F. Ecological background of the future agriculture // Chelovek i zemlya. Moskva: Agropromizdat, 1988. P. 299–303 (in Russian).
 7. Reimers N.F. The price of equilibrium. Experience, search, problems. Moskva: Agropromizdat, 1987. 64 p. (in Russian).
 8. Odum E.P. Fundamentals of Ecology. Third Edition W.B. Philadelphia: Saunders Co., 1971. 574 p.
 9. Odum E.P. Properties of Agroecosystems // Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts. New York: Wiley, 1984. P. 12–18.
 10. Odum E.P., Odum H.T. Natural areas as necessary components of mans total anvironment // Trans. 37-th N.-Amer Wildlife and Resour. Conf. Mexico City: Washington, D. C., 1972. P. 178–189.
 11. Reimers N.F. Greening. Moskva: CEHMI AN SSSR, 1990. 126 p. (in Russian).
 12. Mosienko N.A. The companion of the ecologist: Handbook of ecology and nature management. Saratov: Izd-vo. Sarat. gos. s.- h. akad., 1997. 316 p. (in Russian).
 13. Lopyrev M.I. Agrolandscape design (methodological manual). Voronezh: VGPU, 2006. 118 p. (in Russian).
 14. Kaverin A.V., Masserov D.A. Econology: a course of lectures. Saransk: Mordov. universitet, 2004. 64 p. (in Russian).
 15. Kaverin A.V. Ecological currency of agriculture // Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya. 1985. No. 6. P. 18–24 (in Russian).
 16. Strebkov D.S., Sventickiy I.I., Zhmakin I.K., Korablev V.A., Mudrik V.A. The optimum management in the agrarian production and nature-use on the self-organizational base // TAE 2010: Trends in Agricultural Engineering. 2010. P. 598–602.
 17. Odum H.T., Odum E.C. Energy basis for man and nature. N.Y.: McGraw-Hill, 1976. 297 p.
 18. Reimers N.F. The principles of environmental planning and forecasting // Nature conservation and reproduction of natural resources. Scientific-theoretical and organizational issues of environmental protection: VINITI. Itogi nauki i tekhniki. Moskva, 1978. V. 4. P. 41–73 (in Russian).
 19. Reimers N.F. Ecological planning and management in the system of managing the national economy // Problems of the interaction of society and nature: Tezisy dokladov k teoreticheskoy konferentsii. Moskva: Izd. MGU, 1974. P. 80–83 (in Russian).
 20. Reimers N.F. Environmental Planning // Environmental Problems of Environmental Management: Second School – Symposium: Tezisy dokladov. Moskva, 1976. P. 6–8 (in Russian).
 21. Kaverin A.V., Vasilkina D.N., Vdovin E.S., Geraskin M.M., Rezakov G.R. Agricultural econology and the experience of its application in the practice of land landscape planning in the Republic of Mordovia // Problemy regional'noy ehkologii. 2018. No. 5. P. 180–186 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2019-15180
 22. Terstad J. Swedish experiences of incentives for the protection of nature // The Science of the Total Environment. 1999. V. 240. No. 1–3. P. 189–196.
 23. Hellsten S., Moldan F., Dalgaard T., Rankinen K., Tørseth K., Bakken L., Bechmann M., Kulmala A., Olofsson S., Piil K., Pira K., Turtola E. Abating in Nordic agriculture – policy, measures and way forward // Journal of Environmental Management. 2019. V. 236. P. 674–686. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.143
 24. Tahvanainen L., Ihalainen M., Hietala-Koivu R., Kolehmainen O., Tyrvaainen L., Nousiainen I., Helenius Ju. Measures of the eu agri-environmental protection scheme (gaeps) and their impacts on the visual acceptabilty of finnish agricultural landscapes // Journal of Environmental Management. 2002. V. 66. No. 3. P. 213–227. doi: 10.1006/jema.2002.0489
 25. Brown L.R. Tough choices. Facing the challenge of food. Security. N.-Y.-London: W.W. Norton a Company, 1996. 160 p.
 26. Thalheim G. Reform of the common agricultural policy from the German perspective // Intereconomics. 2001. V. 36. No. 3. P. 122.
 27. Isermann K., Isermann R. Food production and consumption in Germany: N flows and N emissions // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 1998. V. 52. No. 2–3. P. 289–301.
 28. Cepuder P., Shukla M.K. Groundwater nitrate in Austria: a case study in tullnerfeld // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2002. V. 64. No. 3. P. 301–315.
 29. Mouri G., Aisaki N. Using land-use management policies to reduce the environmental impacts of livestock farming // Ecological Complexity. 2015. V. 22. P. 169–177. doi: 10.1016/j.ecocom.2015.03.003
 30. Huber B. The World of Organic Agriculture: Regulations and Certification Emerging Trends 2013 / Research Institute of Organic Agriculture [Internet resource] http://orgprints.org/22324/7/huber_2013_standards.pdf (Accessed: 05.06.2019).
 31. IFOAM Basic Standards (approved by the IFOAM General Assembly), Victoria, Canada, August 2002 [Internet resource] www.ifoam.org (Accessed: 05.06.2019).
 32. The World of Organic Agriculture 2013: Key Indicators and Leading Countries/FiBL& IFOAM (2013) [Internet resource] http://www.organic_world.net/fileadmin/documents/yearbook/2013/web_fibl_ifoam_2013_25_34.pdf (Accessed: 05.06.2019).
 33. Lopyrev M.I. Ecologization of agriculture on a landscape basis. Voronezh: Poliard, 2004. 128 p. (in Russian).
 34. Sysuev V.A., Ustyuzhanin I.A. Agricultural science – environmental aspects // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 1. P. 95–97 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-1-095-097
 35. Sysuev V.A., Kedrova L.I., Utkina E.I. Importance of winter rye for maintaining natural agroecological balance and human health (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 14–20 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-014-020

**Хвосты обогащения фосфоритов
Вятско-Камского месторождения
как вторичные материальные ресурсы
для производства натуральных удобрений**

© 2021. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,

Н. Н. Богатырёва¹, аспирант,

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

Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,

¹Вятский государственный университет,

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

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

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

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

Хвосты обогащения фосфоритов Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна (эфель) характеризуются высоким содержанием глауконита (до 70%) и агрохимически значимым содержанием фосфора (до 6–10% P_2O_5), в связи с чем соответствующий отход может позиционироваться как техногенное месторождение вторичных материальных ресурсов для производства удобрений. На основе хвостов обогащения были приготовлены 4 формы удобрений: эфель, магнитная фракция эфеля (МФ), немагнитная фракция эфеля (НМФ) и активированный эфель (АЭ), представляющий собой композицию эфеля и серо-торфяной суспензии. Лабораторные исследования соответствующих удобрений показали, что внесение их в норме 0,1 г/кг (450 кг/га) приводит к снижению кислотности почвы и увеличению содержания подвижных форм фосфора и серы. Наилучший результат обеспечивается при внесении в почву эфеля и АЭ. Несмотря на низкое содержание P_2O_5 – в 3 раза ниже, чем в фосфоритной муке (ФМ), эффект от внесения эфеля и АЭ уступает эффекту от внесения ФМ только на 20–30%. Результаты исследований показали, что разделение эфеля на МФ и обогащённую фосфором НМФ нецелесообразно, поскольку входящий в состав МФ глауконит способствует активации фосфатов. Активирующий эффект обеспечивается окислением содержащегося в зёрнах глауконита пирита до серной кислоты. Серная кислота способствует переводу трёхзамещённых фосфатов в более растворимые гидрофосфаты. Производство удобрений на основе эфеля позволит перейти к безотходной технологии переработки ценного фосфорсодержащего сырья и снизить себестоимость получаемых удобрений.

Ключевые слова: хвосты обогащения фосфоритов, магнитная и немагнитная фракции эфеля, серо-торфяная суспензия, производство удобрений, натуральные удобрения.

**Tailings of enrichment of phosphorites
of the Vyatka-Kama deposit as secondary
material resources for the production
of natural fertilizers**

© 2021. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, N. N. Bogatyryova¹ ORCID: 0000-0002-6028-6632

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch RAS,

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

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

The tailings of phosphorite enrichment of the Vyatka-Kama phosphorite basin are characterized by a high content of glauconite (up to 70%) and an agrochemically significant content of phosphorus (up to 6–10% of P_2O_5). In this regard, the corresponding waste can be positioned as a technogenic deposit of secondary material resources for production of fertilizers. On the basis of the tailings, 4 forms of fertilizers were prepared: fine tailing (FT), a magnetic fraction of tailing (MF), a non-magnetic fraction of tailing (NMF) and an activated tailing (AT), which is a composition of the waste

and a sulfur-peat suspension. Laboratory studies of the appropriate fertilizers showed that their application at a rate of 0.1 g/kg (450 kg/ha) leads to a decrease in soil acidity and an increase in the content of mobile forms of phosphorus and sulfur. The best result is ensured by introducing the waste and AT into the soil. Despite the low content of P_2O_5 , three times lower than in phosphate flour (PF), the effect of introducing FT and AT is inferior to the effect of introducing PF by only 20–30%. The research results showed that the separation of FT into MF and phosphorus-enriched NMF is inappropriate, since glauconite, which is part of MF, promotes the activation of phosphates. The activating effect is provided by the oxidation of pyrite contained in glauconite grains to sulfuric acid. Sulfuric acid promotes the conversion of trisubstituted phosphates into more soluble hydrophosphates. The production of fertilizers based on FT will allow switching to a waste-free technology for processing valuable phosphorus-containing raw materials and reducing the cost of the resulting fertilizers.

Keywords: tailings of phosphorite enrichment, magnetic and non-magnetic fractions, sulfur-peat suspension, fertilizer production, natural fertilizers.

Вятско-Камское месторождение желваковых фосфоритов (Вятско-Камский фосфоритоносный бассейн) является одним из крупнейших в России. По имеющимся оценкам, на территории бассейна сосредоточено 48,6% разведанных запасов фосфоритовых руд страны [1]. Желваковые фосфориты представляют собой сложные многокомпонентные системы, включающие глауконит, фосфатные и глинистые материалы, а также кальцит, кварц, гипс, соединения железа (пирит, магнетит, гидроксиды железа) и некоторые другие органические и минеральные составляющие [2–4]. Для вятско-камской фосфоритовой руды характерна трудная обогатимость и относительно низкое содержание P_2O_5 на фоне повышенного содержания полуторных оксидов и карбонатов, что существенно осложняет возможность её переработки в концентрированные формы фосфорных удобрений [5]. Основным направлением применения вятско-камских фосфоритов (ВКФ) на протяжении всей истории освоения месторождения было производство фосфоритной муки (ФМ). На рубеже XX–XXI веков спрос на эту продукцию резко упал, и добыча ВКФ стала нерентабельной. Однако в последние годы, в связи с активным развитием органического земледелия (ОЗ), интерес к натуральному фосфатному сырью, пригодному для использования в качестве удобрений, начал увеличиваться. Важнейшим показателем, ограничивающим использование природных фосфатов в ОЗ, является повышенное содержание кадмия. В этом отношении ВКФ соответствуют самым строгим требованиям и стандартам. Исследования показывают, что в качестве удобрений для ОЗ может найти применение не только ФМ, но и хвосты обогащения фосфоритовой руды (эфель) [6]. Эфель представляет собой натуральный мелкозернистый сыпучий материал тёмного цвета, включающий глауконит, фосфориты мелких фракций, глинистые и известковые составляющие, а также другие компоненты,

входящие в состав добываемой руды. Большие запасы хвостов обогащения (более 20 млн т) в настоящее время сосредоточены на территории хвостохранилища Верхнекамского фосфоритного рудника (Кировская область). Содержание глауконита в пробах эфеля, отобранных на разных участках хвостохранилища, достигает 70%, содержание P_2O_5 – 6–10%. Как глауконит, так и природные фосфаты представляют существенную агрохимическую ценность и могут быть использованы в качестве натуральных удобрений и мелиорантов [7], поэтому хвостохранилище можно позиционировать как техногенное месторождение агрохимически ценного сырья, освоение которого позволит повысить эффективность использования природных минеральных ресурсов, получить новые виды востребованной на рынке продукции, снизить отрицательное воздействие отходов производства на окружающую среду.

Цель настоящего исследования состояла в изучении влияния хвостов обогащения вятско-камских фосфоритов и продуктов их переработки на содержание фосфора и серы в почвах.

Объекты и методы исследования

Для выполнения экспериментальных исследований применялись хвосты обогащения, отобранные на территории хвостохранилища Верхнекамского фосфоритного рудника. На основе отобранных образцов были приготовлены следующие формы удобрений: эфель (хвосты обогащения, просеянные через металлическую сетку с размером ячейки 2×2 мм), магнитная (МФ) и немагнитная (НМФ) фракции эфеля, эфель с добавкой серо-торфяной суспензии (активированный эфель). Серо-торфяную суспензию получали методом кавитационной обработки серо-торфяной пульпы. Благодаря кавитационному воздействию суспензия приобретала седиментационную

устойчивость и обогащалась растворимыми формами гумусовых кислот [8]. Активированный эфель (АЭ) получали простым смешиванием компонентов с последующим гранулированием и высушиванием гранул при температуре 100 ± 2 °С. Разделение эфеля на МФ и НМФ проводили методом магнитной сепарации. Магнитная фракция включала преимущественно глауконит, НМФ – фосфатный материал, кальцит, кварц. Трудно разделяемые сростки различных минералов, в зависимости от содержания магнитных компонентов, попадали как в МФ, так и в НМФ. Соотношение масс МФ и НМФ в используемых для экспериментальных исследований образцах эфеля составляло 7 : 3. Для определения элементного состава ФМ, эфеля, МФ и НМФ применяли атомно-эмиссионный и масс-спектральный методы анализа. Согласно полученным результатам, содержание кадмия во всех формах удобрений, кроме НМФ, было ниже 0,2 мг/кг (в НМФ – 0,25 мг/кг). Изучение влияния приготовленных удобрений на содержание подвижного фосфора ($P_2O_{5\text{подв.}}$) в почвах проводилось в сравнении с Верхнекамской ФМ (ООО «Верхнекамские удобрения»). Данные о содержании в удобрениях основных элементов минерального питания растений и соединений, оказывающих влияние на подвижность фосфора в почвах, приведены в таблице 1.

Согласно приведённым данным, как эфель, так и все формы удобрений, приготовленных на его основе, имели по сравнению с ФМ более низкое содержание P_2O_5 и более высокое содержание серы и полуторных оксидов (Fe_2O_3 , Al_2O_3). Как известно, полуторные оксиды оказывают отрицательное влияние на подвижность фосфора в почвах [9, 10]. Все формы удобрений содержали серу в форме сульфидов (пирит) и сульфатов (гипс). Активированный эфель дополнительно содержал элементарную серу (S^0) и диспергированный

торф. Наибольшее содержание сульфидов было характерно для богатых глауконитом форм удобрений – МФ и эфеля.

Изучение влияния приготовленных удобрений на содержание в почве $P_2O_{5\text{подв.}}$ выполнялось в лабораторных условиях. Для выполнения исследований использовалась бедная элементами питания почва (грунт), отобранная вблизи г. Кирова с глубины 0–20 см. Данные о свойствах почвы приведены в таблице 2.

Почву с добавками приготовленных удобрений помещали в пластиковые контейнеры и увлажняли деионизированной водой до влажности $50 \pm 5\%$. Контейнеры накрывали перфорированной полипропиленовой плёнкой и выдерживали в течение всего эксперимента при температуре 22 ± 2 °С. Добавки удобрений вносили из расчёта 100 мг на 1 кг воздушно-сухой почвы, что ориентировочно соответствовало 450 кг/га. Масса почвы в каждом контейнере составляла 1 кг (в расчёте на сухое вещество). Влажность почвы в ходе эксперимента контролировали гравиметрическим методом. При снижении массы контейнера на 20 г, в него добавляли деионизированную воду. Отбор проб для проведения химических анализов проводили 1 раз в 2 недели. Химический анализ включал определение показателей, приведённых в таблице 2. Каталазную активность (КА) определяли с целью оценки активности протекания аэробных микробиологических процессов в почвах [11, 12]. Общее время исследований составило 6 недель с момента закладки опыта.

Эксперимент выполняли в трёхкратной повторности. Полученные результаты статистически обрабатывали в программе Microsoft Excel. В таблицах приведены средние арифметические значения показателей и среднеквадратические отклонения (за исключением показателя рН, для которого указаны средние значения и нормативная погрешность в соответствии с ГОСТ 26483-85).

Таблица 1 / Table 1
Химический состав удобрений на основе хвостов обогащения фосфоритов
Chemical composition of fertilizers based on tailings of phosphorite enrichment

Удобрение Fertilizer	Содержание, % масс / Content, mass %						
	P_2O_5	$S_{\text{обм.}}$ S_{total}	K_2O	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	O
Эфель / Fine tailings	7,2	2,0	3,8	13,6	7,7	13,5	0
Активированный эфель / Activated fine tailings	6,0	8,3	3,2	11,4	6,4	11,3	8,2
Немагнитная фракция / Nonmagnetic fraction	13,1	4,0	1,3	25,9	3,2	5,2	0
Магнитная фракция / Magnetic fraction	4,2	0,9	4,7	6,9	9,5	16,8	0
Фосфоритная мука / Phosphorite flour	23	0,9	1,2	37,6	2,6	4,9	0

Примечание / Note: O – органическое вещество (торф) / organic matter (peat).

Свойства почвы, используемой для проведения эксперимента
Properties of soil used for the experiment

№	Показатели Indicators	Значение Value	Метод анализа Method of analysis
1	pH_{KCl} , ед. pH_{KCl} , pH unit	$5,2 \pm 0,1$	Потенциометрический по ГОСТ 26483-85 Potentiometric by GOST 26483-85
2	Органическое вещество, % Organic matter, %	$2,8 \pm 0,7$	Метод Тюрина в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26213-91 / Tyurin's method in TSINAO modification by GOST 26213-91
3	Подвижные соединения фосфора (P_2O_5), мг/кг Mobile compounds of phosphorus (P_2O_5), mg/kg	44 ± 9	Фотометрический по ГОСТ Р 54650-2011 Photometric by GOST R 54650-2011
4	Подвижные соединения калия (K_2O), мг/кг Mobile compounds of potassium (K_2O), mg/kg	105 ± 16	Пламенная фотометрия по ГОСТ Р 54650-2011 Flame photometry by GOST R 54650-2011
5	Нитраты, мг/кг Nitrates, mg/kg	$1,3 \pm 0,4$	Ионометрический по ГОСТ 26951-86 Ionometric by GOST 26951-86
6	Подвижные соединения серы (S), мг/кг Mobile compounds of sulfur (S), mg/kg	$1,02 \pm 0,06$	Метод ЦИНАО по ГОСТ 26490-85 TSINAO method by GOST 26490-85
7	Механический состав Mechanical composition	лёгкий суглинок light loam	По Н. А. Качинскому мокрым методом (метод скатывания) Wet method by Kachinsky (rolling method)
8	Каталазная активность (O_2 см ³ /(г · мин) Catalase activity (O_2 cm ³ /(g · min)	$1,3 \pm 0,1$	Газиметрический метод по Ф. Х. Хазиеву Gasometric method by Khaziev

Достоверность различий оценивалась по критерию Стьюдента.

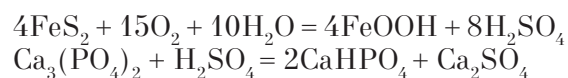
Результаты и обсуждение

В таблицах 3–6 приведены данные о динамике контролируемых показателей при внесении разных форм приготовленных удобрений.

Внесение всех форм удобрений привело к незначительному повышению pH_{KCl} почвы относительно контроля, что наиболее отчетливо проявилось через 4 недели после начала эксперимента (табл. 3). Повышение pH_{KCl} обусловлено наличием во всех формах удобрений известковых компонентов и трёхзамещённых фосфатов, способных связывать ионы H^+ .

Согласно полученным результатам, внесение эфеля, ФМ и АЭ привело к статистически значимому повышению содержания $P_2O_{5\text{подв}}$ в почве, которое наблюдалось на протяжении всего эксперимента (табл. 4). Внесение НМФ обеспечивало кратковременный эффект. Наилучший результат наблюдался при внесении ФМ, содержащей значительно больше фосфора, чем другие формы удобрений. Самые высокие значения $P_2O_{5\text{подв}}$ фиксировали через 2 недели после начала эксперимента, затем подвижность фосфора начинала снижаться. Коэффициент корреляции между содержа-

нием P_2O_5 в удобрениях (за исключением АЭ) и $P_2O_{5\text{подв}}$ в почве через 2 недели после начала эксперимента составил 0,99; через 4 недели этот показатель снизился до 0,80; через 6 недель – до 0,74. Интересный результат наблюдался при сравнении ФМ, эфеля и АЭ. Содержание P_2O_5 в ФМ выше, чем в эфеле и АЭ в 3,2 и 3,8 раза соответственно, кроме того, ФМ содержит меньше полуторных оксидов, чем МФ и эфель, однако эффект от внесения эфеля был ниже, чем от ФМ только в 1,3, а от внесения АЭ – в 1,2 раза. Можно предположить, что содержащиеся в эфеле малорастворимые трёхзамещённые фосфаты активируются (переходят в растворимые гидрофосфаты) за счёт кислот, образующихся при микробиологическом окислении пирита, присутствующего в зёрнах глауконита:



Таким образом, совместное внесение фосфат- (НМФ) и глауконитсодержащих (МФ) компонентов приводит к более выраженному эффекту, чем их раздельное внесение. Микробиологическое окисление S^0 , содержащейся в составе АЭ, также приводит к образованию кислот, способствующих растворению фосфа-

тов, что объясняет более высокое содержание подвижного P_2O_5 при внесении АЭ по сравнению с внесением эфеля, не содержащего серо-торфяной суспензии.

В таблице 5 приведены данные о влиянии удобрений на содержание в почвах подвижных соединений серы ($S_{\text{подв.}}$).

Результаты исследований показывают, что повышение содержания $S_{\text{подв.}}$ наблюдается во всех вариантах эксперимента, кроме контроля. К концу второй недели максимальное накопление $S_{\text{подв.}}$ было установлено в вариантах с НМФ, ФМ и АЭ. Через 6 недель наибольшее содержание $S_{\text{подв.}}$ было характерно для вариантов с МФ и эфелем, т. е. для форм удобрений, содержащих серу в форме пирита. В аэробных условиях пирит достаточно легко

окисляется микроорганизмами и сера постепенно переходит в доступное для растений состояние [13, 14]. При внесении МФ, эфеля и АЭ наблюдалась положительная динамика накопления $S_{\text{подв.}}$ в течение всего эксперимента. Внесение ФМ и НМФ привело к повышению содержания $S_{\text{подв.}}$ в почве в течение первых двух недель, затем начала проявляться тенденция к снижению этого показателя, что можно объяснить связыванием серы почвенными микроорганизмами. Косвенно это подтверждается ростом КА в соответствующих вариантах эксперимента, свидетельствующей об активизации микробных сообществ почвы [15]. Накопление $S_{\text{подв.}}$ при внесении в почву эфеля и удобрений на его основе представляет большой агрохимический интерес в связи

Таблица 3 / Table 3

Динамика кислотности почвы ($pH_{\text{КСП}}$, ед. pH)
Dynamics of soil acidity ($pH_{\text{КСП}}$, pH unit)

Вариант эксперимента Experiment variant	После начала эксперимента After the start of the experiment		
	через 2 недели after 2 weeks	через 4 недели after 4 weeks	через 6 недель after 6 weeks
Контроль (почва без добавок) Control (soil without additives)	5,2±0,1	5,2±0,1	5,1±0,1
Магнитная фракция эфеля Magnetic fraction of fine tailings	5,4±0,1	5,5±0,1*	5,5±0,1*
Немагнитная фракция эфеля Nonmagnetic fraction of fine tailings	5,4±0,1	5,6±0,1*	5,5±0,1*
Эфель / Fine tailings	5,3±0,1	5,6±0,1*	5,5±0,1*
Фосфоритная мука / Phosphorite flour	5,5±0,1*	5,6±0,1*	5,6±0,1*
Активированный эфель / Activated fine tailings	5,4±0,1	5,5±0,1*	5,5±0,1*

Примечание: * – значения, отличающиеся от контроля при $p < 0,05$.
Note: * – values that differ from the control at $p < 0.05$.

Таблица 4 / Table 4

Динамика содержания подвижных соединений фосфора (P_2O_5 , мг/кг) в почве
Dynamics of the content of mobile phosphorus compounds (P_2O_5 , mg/kg) in the soil

Вариант эксперимента Experiment variant	После начала эксперимента After the start of the experiment		
	через 2 недели after 2 weeks	через 4 недели after 4 weeks	через 6 недель after 6 weeks
Контроль (почва без добавок) Control (soil without additives)	43,9±2,2	42,9±3,0	42,4±3,1
Магнитная фракция эфеля Magnetic fraction of fine tailings	50,4±3,9	40,4±3,5	40,8±1,9
Немагнитная фракция эфеля Nonmagnetic fraction of fine tailings	61,4±4,3*	45,4±3,8	42,5±1,5
Эфель / Fine tailings	55,4±2,1*	57,4±1,5*	54,6±2,4*
Фосфоритная мука / Phosphorite flour	80,9±2,8*	73,4±2,5*	65,4±2,3*
Активированный эфель / Activated fine tailings	66,4±3,1*	63,9±2,0*	57,5±1,8*

Примечание: * – значения, отличающиеся от контроля при $p < 0,05$.
Note: * – values that differ from the control at $p < 0.05$.

Таблица 5 / Table 5

Динамика содержания подвижных соединений серы ($S_{\text{подв.}}$, мг/кг) в почве
Dynamics of the content of mobile sulfur compounds (S_{mobile} , mg/kg) in the soil

Вариант эксперимента Experiment variant	После начала эксперимента After the start of the experiment		
	через 2 недели after 2 weeks	через 4 недели after 4 weeks	через 6 недель after 6 weeks
Контроль (почва без добавок) Control (soil without additives)	3,3±0,1	3,3±0,2	3,3±0,3
Магнитная фракция эфеля Magnetic fraction of fine tailings	5,3±0,2*	7,3±0,7*	10,23±1,1*
Немагнитная фракция эфеля Nonmagnetic fraction of fine tailings	6,3±0,4*	6,3±0,4*	5,9±0,4*
Эфель / Fine tailings	4,6±0,2*	6,9±0,3*	8,6±0,4*
Фосфоритная мука / Phosphorite flour	6,3±0,5*	5,9±0,6*	5,6±0,2*
Активированный эфель Activated fine tailings	6,3±0,4*	6,3±0,7*	6,6±0,3*

Примечание: * – значения, отличающиеся от контроля при $p < 0,05$.
Note: * – values that differ from the control at $p < 0.05$.

Таблица 6 / Table 6

Динамика каталазной активности почвы (O_2 см³/(г · мин))
Dynamics of the catalase activity of the soil (O_2 cm³/(g · min))

Вариант эксперимента Experiment variant	После начала эксперимента After the start of the experiment		
	через 2 недели after 2 weeks	через 4 недели after 4 weeks	через 6 недель after 6 weeks
Контроль (почва без добавок) Control (soil without additives)	1,3±0,1	0,8±0,1	0,9±0,1
Магнитная фракция эфеля Magnetic fraction of fine tailings	1,8±0,1*	1,6±0,2*	1,2±0,1*
Немагнитная фракция эфеля Nonmagnetic fraction of fine tailings	1,4±0,2	1,1±0,1*	1,5±0,2*
Эфель / Fine tailings	1,5±0,2	1,4±0,1*	1,3±0,1*
Фосфоритная мука / Phosphorite flour	1,1±0,1	1,2±0,1*	1,4±0,2*
Активированный эфель / Activated fine tailings	1,3±0,1	1,2±0,1*	1,3±0,1*

Примечание: * – значения, отличающиеся от контроля при $p < 0,05$.
Note: * – values that differ from the control at $p < 0.05$.

с развивающимся дефицитом этого элемента в агроэкомах [16, 17]. Традиционные растворимые серосодержащие удобрения (сульфаты аммония и калия) имеют существенный недостаток, а именно быструю вымываемость сульфатов из корнеобитаемого горизонта почвы. В отличие от растворимых удобрений, эфель характеризуется пролонгированным периодом действия. Постепенное окисление сульфидов в почвах способствует обеспечению растений доступными сульфатами на протяжении всего периода вегетации.

В таблице 6 приведены данные об изменении КА почвы в ходе эксперимента.

Наиболее значительное повышение КА в начале эксперимента наблюдалось при

внесении в почву МФ и эфеля. Вероятной причиной этого явления могло стать активное окисление пирита [18, 19]. По мере накопления в субстрате окисленных форм серы и, соответственно, снижения содержания пирита, интенсивность протекания микробиологических окислительно-восстановительных процессов в почвах снижалась, и КА уменьшалась.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что хвосты обогащения фосфоритовых руд Верхнекамского фосфоритного рудника могут быть использованы в качестве вторичных материальных ресурсов для произ-

водства фосфорно-серных удобрений, сравнимых по эффективности с ФМ. К достоинствам соответствующих удобрений следует отнести низкую стоимость, натуральный состав, пролонгированный период действия, отсутствие подкисляющего воздействия на почвы, экологическую безопасность. Внедрение технологии переработки эфеля в удобрения позволит решить важнейшую задачу комплексной безотходной переработки ценного фосфорсодержащего сырья и снизить себестоимость получаемых удобрений.

Разделение эфеля на обогащенную фосфором НМФ и глауконитсодержащую МФ нецелесообразно, поскольку глауконит обогащает почвы калием и микроэлементами, а также благодаря примеси пирита активизирует фосфатные компоненты. Совместное внесение глауконита и труднорастворимых фосфатов приводит к синергическому эффекту, способствующему обогащению почвы подвижными фосфором и серой. Для повышения агрохимической ценности эфеля и производства удобрений в удобной для внесения гранулированной форме может применяться серо-торфяная суспензия.

Большие запасы эфеля, сосредоточенные на территории хвостохранилища, отсутствие затрат на работы по добыче и простая технология их переработки в целевой продукт позволяют организовать на основе соответствующего вторичного сырья производство бюджетных минеральных и органоминеральных удобрений. Такие удобрения особенно необходимы для восстановления плодородия почв Кировской области, характеризующихся повышенной кислотностью, низким содержанием фосфора и выраженным дефицитом серы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Karpova M.I., Fakhrutdinov R.Z., Nepryakhin A.E., Mezhuiev S.V. Russian phosphorites: state, problems, strategy of development of mineral resource base // Razvedka i okhrana nedr. 2009. No. 10. P. 33–37 (in Russian).
2. Shatrov V.A., Sirotnin V.I., Voytsekhovskiy G.V., Zhabin A.V. Phosphorites of Vyatka-Kama deposit: paleogeographic reconstruction // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2006. No. 1. P. 24–31 (in Russian).
3. Minakovskiy A.F., Shatilo V.I., Larionova O.I., Dormeshkin O.B., Stoyanova L.F., Akhtyamova S.S. Study of an acid-free method of processing phosphorite from the Vyatka-Kama deposit into complex fertilizers // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2016. V. 19. No. 8. P. 43–49 (in Russian).
4. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Optimization of the composition of fertilizers based on ground phosphorites // Butlerovskie soobshcheniya. 2019. V. 60. No. 12. P. 133–139 (in Russian).
5. Smirnov Yu.M., Brazhnik I.S., Kholomyanskiy I.Ya., Torskiy G.A. On obtaining phosphate raw materials for the production of complex fertilizers from ferruginous phosphorites of the Egorievsk and Vyatka-Kama deposits // Khimicheskaya promyshlennost' segodnya. 2011. No. 1. P. 18–26 (in Russian).
6. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 160–166 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-160-166
7. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Glauconites of the Vyatka-Kama phosphorite-bearing basin // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 117–122 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-117-122
8. Terentiev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic efel // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-134-141
9. Shen J., Yuan L., Zhang J., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W., Zhang F. Phosphorus dynamics: from soil to plant // American Society of Plant Biologists. 2011. V. 156. P. 997–1005. doi: 10.1104/pp.111.175232
10. Onweremadu E.U., Omeke J., Onyia V.N., Agu C.M., Onwubiko N.C. Inter-horizon variability in phosphorus-sorption capability of sesquioxide-rich soils Southeastern Nigeria // Journal of American Science. 2007. V. 3. No. 1. P. 43–48.
11. Samuel A.D., Bungau S., Tit D.M., Melinte (Frunzulica) C.E., Purza L., Badea G.E. Effects of long term application of organic and mineral fertilizers on soil enzymes // Revista de Chimie (Bucharest). 2018. V. 69. No. 10. P. 2608–2612. doi: 10.37358/RC.18.10.6590
12. Walkiewicz A., Brzezińska M., Bieganowski A., Sas-Paszt L., Frąc M. Early response of soil microbial biomass and activity to biofertilizer application in degraded brunic arenosol and abruptic luvisol of contrasting textures // Agronomy. 2020. V. 10. No. 9. Article No. 1347. doi: 10.3390/agronomy10091347
13. Freney J.R. Oxidation of sulphur in soils // Mineralium Deposita. 1967. V. 2. P. 181–187.

14. Tourna M., Maclean P., Condon L., O'Callaghan M., Wakelin S.A. Links between sulphur oxidation and sulphur-oxidising bacteria abundance and diversity in soil microcosms based on soxB functional gene analysis // *FEMS Microbiology Ecology*. 2014. V. 88. No. 3. P. 538–549. doi: 10.1111/1574-6941.12323
15. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China // *Plant Soil Environ.* 2008. V. 54. No. 8. P. 341–346.
16. Aristarkhov A. Sulfur in agroecosystems of Russia: monitoring of content in soils and the effectiveness of its use // *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2016. No. 5. P. 39–47 (in Russian).
17. Guzy S., Aksomaitiene R. Migration of sulphur in limed soils differing in agricultural management // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2005. V. 71. No. 2. P. 191–201. doi: 10.1007/s10705-004-3175-6
18. Olson K.R., Gao Y., DeLeon E.R., Ari M., Arif F., Arora N., Straub K.D. Catalase as a sulfide-sulfur oxidoreductase: An ancient (and modern?) regulator of reactive sulfur species (RSS) // *Redox Biology*. 2017. V. 12. P. 325–339. doi: 10.1016/j.redox.2017.02.021
19. Tabak M., Lisowska A., Filipek-Mazur B. Bioavailability of sulfur from waste obtained during biogas desulfurization and the effect of sulfur on soil acidity and biological activity // *Processes*. 2020. V. 8. No. 863. P. 1–17. doi: 10.3390/pr8070863

Влияние нового биокомпозита на основе грибов рода триходерма на почвенные микроорганизмы и растения разных таксонов

© 2021. А. А. Калинин¹, к. б. н., директор, Д. С. Давидюк¹, н. с.,
Н. А. Боков^{2,3}, магистрант, Р. И. Абубакирова², м. н. с.,
А. А. Широких^{2,3}, д. б. н., в. н. с., профессор,
¹ООО «Ризобиотики-Вятка»,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 198, корп. 2,
²ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: aleshirokikh@yandex.ru

В условиях модельных опытов проведена экологическая оценка нового биокомпозитного препарата на основе штаммов *Trichoderma* sp. L-6, L-3 и D-11, разрабатываемого для биодеструкции пожнивных остатков. Оценивали влияние биокомпозита (титр не менее 10⁹ кл./мл) на микробный комплекс дерновой почвы при внесении в количествах, соответствующих рекомендуемой (2 л/га), уменьшенной (1 л/га) и увеличенной (4 л/га) гектарным дозам. Спустя 45 сут учитывали численность основных эколого-трофических и таксономических групп микроорганизмов, участвующих в циклах трансформации азота и углерода. Расчёт экологических коэффициентов минерализации и педотрофности, характеризующих направленность микробиологических процессов, не выявил существенных изменений в структуре почвенного микробного сообщества по сравнению с интактной почвой. Тест-культурами для изучения фитотоксичности *Trichoderma* spp. служили *Triticum aestivum*, *Sinapis alba*, *Trifolium pannonicum*. Исходная препаративная форма всех исследуемых штаммов подавляла жизнедеятельность растений. При разбавлении 1:10 и 1:100 фитотоксичность уменьшалась, и проявлялись ростостимулирующие свойства штаммов. Наибольший уровень фитотоксического воздействия был обнаружен в отношении крестоцветной культуры, ростостимулирующий эффект – в отношении бобовой культуры. Для пшеницы эффекта не обнаружено. На основе полученных результатов сделаны рекомендации по практическому использованию биокомпозита на основе грибов триходерма.

Ключевые слова: *Trichoderma*, биопрепарат, почвенные микроорганизмы, фитотоксичность.

Effect of the new biological product created on the basis of *Trichoderma* on soil microorganisms and plants of different taxons

© 2021. A. A. Kalinin¹ ORCID: 0000-0001-6605-2290, D. S. Davidyuk¹ ORCID: 0000-0002-4014-9673,
N. A. Bokov^{2,3} ORCID: 0000-0002-1000-1192, R. I. Abubakirova² ORCID: 0000-0002-8526-2733,
A. A. Shirokikh^{2,3} ORCID: 0000-0002-7808-0376,
¹ООО “Rhizobiotics-Vyatka”,
198/2, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
²Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: aleshirokikh@yandex.ru

The environmental assessment of a new biocomposite preparation based on *Trichoderma* sp. L-6, L-3, and D-11 strains for the biodegradation of crop residues was carried out under the conditions of model experiments. The effect of biocomposite (titer not less than 10⁹ cells/mL) on the microbial complex of turf soil was evaluated when applied in quantities corresponding to the recommended (2 L/ha), reduced (1 L/ha) and increased (4 L/ha) hectare doses. After 45 days the number of the main ecological-trophic and taxonomic groups of microorganisms involved in the nitrogen and carbon transformation cycles was taken into account. The calculation of ecological coefficients of mineralization and pedotrophy, which characterize the direction of microbiological processes, did not reveal significant changes in the

structure of the soil microbial community in comparison with intact soil. *Triticum aestivum*, *Sinapis alba*, and *Trifolium pannonicum* were used as test cultures to study the phytotoxicity of *Trichoderma* spp. The initial preparative form of all the studied strains suppressed the vital activity of plants. When diluted with 1:10 and 1:100, phytotoxicity decreased, and the growth-stimulating properties of the strains were manifested. The highest level of phytotoxic effects was found in the cruciferous culture, growth-stimulating effect – in the legume culture. Based on the results obtained, recommendations are made for the practical use of a biocomposite based on *Trichoderma* fungi.

Keywords: *Trichoderma*, biological product, soil microorganisms, phytotoxicity.

Микроскопические почвенные грибы *Trichoderma* spp. являются одними из наиболее широко используемых биоагентов в современном сельском хозяйстве [1]. Популярность этих грибов обусловлена способностью производить несколько сотен вторичных метаболитов, часть из которых являются антимикробными; индуцировать местную и системную резистентность растений к поражению вредителями и патогенами [2]; повышать эффективность использования питательных веществ (особенно азота), стимулировать рост растений и придавать устойчивость к абиотическим стрессам [3, 4]. Основным ограничением при использовании этих биоагентов является нестабильность их действия в полевых условиях по сравнению с химическими аналогами, которые в меньшей степени подвержены влиянию факторов окружающей среды [5]. Однако в закрытом грунте грибы *Trichoderma* широко и успешно используют вместо химических фунгицидов [6]. Биоконтрольный эффект *Trichoderma* связан с продукцией антибиотически активных алкилпирионов [7], поликетидных антибиотиков (харзианолид) [8], циклоспоринов [9] и линейных пептидов класса пептаиболов [10]. Синергизм пептаиболов с ферментами деградации клеточной стенки ингибируют рост микопатогенов и повышают резистентность растений к возбудителям болезней [4].

Токсины грибов триходерма могут являться причиной токсикозов почв [11]. Виридин, виридиол, глиотоксин, конингин А и В, триховиридин и другие являются примерами фитотоксических веществ, продуцируемых *Trichoderma* spp. [12]. Фитотоксичность виридиола изучена в большей степени, чем токсичность других вторичных метаболитов, синтезируемых видами *Trichoderma*. Виридиол адсорбируется в почве и проявляет максимальную токсичность по отношению к однолетним растениям. Типичными симптомами являются низкая всхожесть семян и недостаточное развитие корневой системы. Штаммы, выделяющие токсины, используются в качестве гербицидов [13]. Вариабельность уровня антимикробных соединений и

гербицидов, выделяемых грибами, влияет на возможность применения видов *Trichoderma* для биоконтроля фитопатогенов.

Грибы рода *Trichoderma* – активные целлюлозолитики. В сельском хозяйстве целюлазы триходермы впервые были использованы в производстве кормов. Разработаны технологии микробиологической биоконверсии отходов сельского хозяйства, пищевой и зерноперерабатывающей промышленности в высококачественные углеводно-белковые кормовые добавки и комбикорма [6, 7]. Получены опытные партии компостов на основе отходов с использованием микромицетов рода *Trichoderma*, выделенные на территории Республики Татарстан [13]. В последнее время наметилась тенденция нового применения *Trichoderma* spp. – в качестве основы биопрепаратов для более эффективной трансформации содержащих лигноцеллюлозу растительных полимеров в компоненты гумуса. При интродукции гриба в почву корневые, пожнивные и другие послеуборочные остатки способствуют её улучшению, так как являются отличным трофическим субстратом для роста триходермы [14]. В частности, разрабатывается новый биокондитивный препарат (ООО «Микробиотика», Республика Беларусь) на основе штаммов *Trichoderma* L-6, L-3 и D-1, который наряду с биоконтрольным и ростстимулирующим действием, обладает ферментативной активностью и может, при внесении в почву по стерне или другим послеуборочным остаткам, являться средством повышения почвенного плодородия. Препаративная форма биокондита представляет собой суспензионный концентрат – коллоидный раствор в виде жидкой сметанообразной массы вспомогательного вещества и биомассы выращенных по отдельности штаммов, объединяемых в равном объёмном соотношении непосредственно перед использованием.

Несмотря на отдельные работы, констатирующие положительные эффекты *Trichoderma* spp. в отношении микробного комплекса почвы и продуктивности отдельных сельскохозяйственных культур [15–17], нужно учитывать, что каждый штамм обладает

уникальным спектром вторичных метаболитов разнонаправленного действия. Отрицательные эффекты метаболитов *Trichoderma* на почвенную микробную систему и рост растений могут ограничить использование грибов как биотехнологических агентов. Для исключения возможных нежелательных последствий применения коммерческих штаммов *Trichoderma* spp. для растений и почвы необходима соответствующая экологическая оценка.

Целью работы являлось изучение влияния нового биокомпозита грибов рода триходерма на почвенный микробный комплекс и рост проростков культур разной таксономической принадлежности.

Объекты и методы исследования

Действие нового биокомпозитного препарата на основе грибов триходерма (титр не менее 1 млрд кл./мл) изучали в модельном эксперименте. В контейнеры объёмом 1,0 дм³ помещали по 425 г воздушно-сухой (в.-с.) дерновой почвы и увлажняли её до 80% от полной почвенной влагоёмкости. Биопрепарат, в зависимости от варианта, вносили в почву из расчёта $1,5 \cdot 10^5$; $0,75 \cdot 10^5$ и $3,0 \cdot 10^5$ кл./г, что соответствовало рекомендуемой (2 л/га), пониженной (1 л/га) и повышенной (4 л/га) гектарным дозам, с учётом объёмного веса почвы (1,3 г/см³). Контролем служила интактная почва. Каждый вариант закладывали в трёх повторениях. Контейнеры с почвой инкубировали в течение 45 сут при 20±2 °С.

Для характеристики экологического состояния почвы определяли численность различных эколого-трофических групп микроорганизмов (МО). Усваивающие органические формы азота (аммонифицирующие) МО учитывали на мясо-пептонном агаре (МПА), усваивающие минеральные источники азота (амилолитики) – на крахмало-аммиачном

агаре (КАА), целлюлозолитики – на агаре Гетчинсона (ГА) с фильтровальной бумагой, олиготрофные – на почвенном агаре (ПА), микроскопические грибы – на агаре Чапека (ЧА) [18]. Для характеристики изменений в структуре почвенного микробного сообщества рассчитывали коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и педотрофности (ПА/МПА) [19]. Микроморфологию грибов изучали на живых препаратах при увеличении ×200 и ×400, микроскоп Leica DM 2500 (Германия).

Фитотоксическое действие оценивали, тестируя штаммы *Trichoderma* sp. L-6, L-3 и D-11 по отдельности. В качестве тест-культур использовали пшеницу яровую (*Triticum aestivum* L.) Приокская, клевер паннонский (*Trifolium pannonicum* L.) Снежок, горчицу белую (*Sinapis alba* L.). Семена замачивали на 20 ч в разведениях препарата водой 1:10, 1:100 и без разведения. Контролем служили семена, замоченные в дистиллированной воде. Обработанные семена проращивали в течение 6 сут при комнатной температуре (20±2 °С). Учитывали всхожесть, высоту побега, длину корня и сухую биомассу проростков.

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Excel.

Результаты и обсуждение

Определение численности МО методом посева из разведений на твёрдые питательные среды показало, что интактная дерновая почва, в соответствии с ориентировочной шкалой обогащённости почвы микрофлорой [19], может быть отнесена к «очень богатой» в отношении аммонифицирующих (14 млн КОЕ/г на МПА), амилолитических (28 млн КОЕ/г на КАА) и олиготрофных (72 млн КОЕ/г на ПА) МО (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Количество микроорганизмов разных эколого-трофических и таксономических групп в зависимости от дозы внесённого в почву препарата
The number of microorganisms of different ecological-trophic and taxonomic groups depending on the dose of the drug introduced into the soil

Доза, л/га Dose, L/ha	Общая численность на ..., тыс. КОЕ/г в.с. почвы Total number on the ..., thousand CFU/g air dry soil				Доля зарастания ГА грибом <i>Trichoderma</i> , % / Percentage of overgrowth of HA by fungus, %
	МПА / MPA	КАА / SAA	ПА / SA	ЧА / ChA	
0	13939	28044	71770	130	56,7±20,2
1	9944	31876	94320	259	68,3±7,6
2	21795	35782	130410	87	58,3±17,6
4	14027	12013	43540	83	65,0±13,2
НСР ₀₉₅	7742	5012	63440	148	–

Коэффициенты, характеризующие направленность микробиологических процессов почвы
Coefficients characterizing the direction of soil microbiological processes

Доза, л/га Dose, L/ha	Коэффициенты / Coefficients of	
	минерализации / mineralization КАА / МПА SAA / MPA	педотрофности / pedotrophy ПА / МПА SA / MPA
0	2,01	5,15
1	3,21	9,49
2	1,64	5,98
4	0,87	3,10

В результате внесения в почву различных доз биокомпозита численность этих групп МО существенно не изменилась. В то же время количество грибных пропагул, учитываемых на ЧА и ГА, не превышало сотен тысяч КОЕ/г, что соответствует градации «очень бедная» почва. Путём прямой микроскопии колоний на ЧА установлено, что доля образуемых микромицетами рода *Trichoderma* колоний в почве контрольного варианта составляла 5%, тогда как в вариантах с внесением биопрепарата доленое участие триходермы в комплексе грибов изменялось в пределах от 22 до 38% в зависимости от дозы.

На ГА среди целлюлозолитиков также доминировала триходерма (рис. 1), но доля покрытия ею целлюлозного диска изменялась по вариантам несущественно (табл. 1).

Дополнительную информацию об экологическом состоянии микробного комплекса почвы дал расчёт экологических коэффициентов (табл. 2). Значения коэффициента минерализации (КМ), близкие к единице, принято считать показателем сбалансированности процессов разложения безазотистого и азотсодержащего органического вещества (ОВ) почвы; значения, превышающие единицу, указывают на повышенную интенсивность процессов минерализации ОВ и обеспеченность почвы минеральными формами азота; значения КМ 2–3 косвенно могут свидетельствовать о повышении скорости разложения гумуса. Внесение в почву биопрепарата оказало на процессы минерализации ОВ почвы регуляторное действие, на что указывает изменяющаяся по вариантам величина КМ (табл. 2).

Обработка почвы биопрепаратом в дозе 2 л/га (рекомендуемой) привела к незначительному снижению КМ с 2,0 в контроле до 1,6 в опытном варианте. При двукратном превышении рекомендуемой дозы (4 л/га) исходное значение КМ снизилось до 0,87, что может указывать на заторможенность процес-

сов минерализации по сравнению с контролем и вариантом со сниженной дозой препарата (1 л/га), в котором КМ, напротив, увеличился до 3,2. Ранее уже отмечалось, что внесение в почву *T. asperellum* положительно влияло на минерализацию органических субстратов и изменяло грибные популяции [17].

В зависимости от дозы препарата изменились различным образом по сравнению с контролем также значения индекса педотрофности, отражающего степень представленности в почве микрофлоры, связанной с формированием гумуса. При внесении пониженной дозы (1 л/га) он повысился (до 9,4), а при повышенной (4 л/га), напротив, – снизился до 3,1. Считается, что почвы с высокими значениями данного индекса более приближены к естественным ценозам изучаемой почвенно-климатической зоны и обладают большей устойчивостью к негативным воздействиям [13]. Отмеченные в модельном эксперименте эффекты биопрепарата, выразившиеся в изменении соотношения отдельных групп МО и направленности процессов трансформации почвенного органического вещества, можно, в определённой степени, экстраполировать и на реальные почвенные условия. Поэтому полевая доза внесения препарата должна корректироваться, в зависимости от степени обогащения МО и интенсивности процессов трансформации и гумификации ОВ конкретной почвы.

Одним из важных показателей экологической безопасности биопрепарата является его взаимодействие с культурным растением, то есть степень фитотоксичности интродуцента. Исходная препаративная форма исследуемых штаммов подавляла на 76–89% всхожесть семян и на 38–62% линейный рост проростков всех тест-культур (рис. 2).

Наибольший уровень фитотоксического воздействия штаммов L-3 и L-6 был обнаружен в отношении крестоцветной культуры *S. alba*, но при разбавлении 1:10 их фитотоксичность

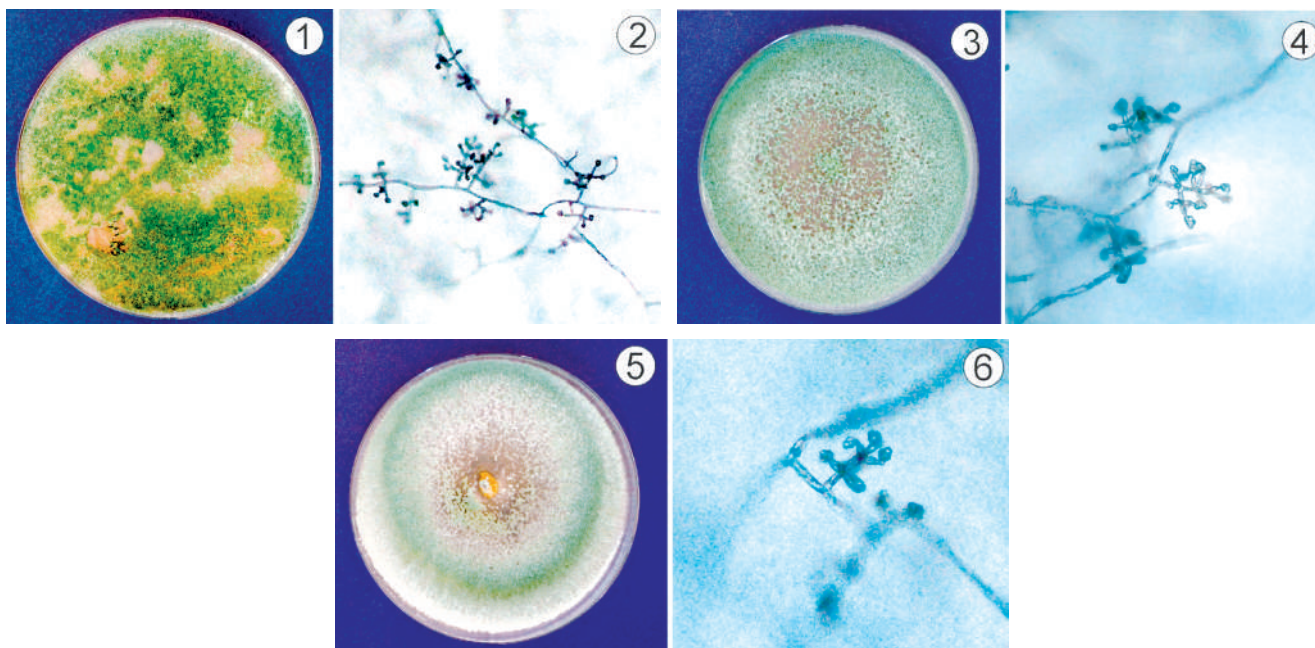


Рис. 1. Колонии и микроскопия *Trichoderma* spp.: штаммы L-6 (1, 2), L-3 (3, 4) и D-11 (5, 6)
Fig. 1. Colonies and microscopy of *Trichoderma* spp.: strains L-6 (1, 2), L-3 (3, 4), D-11 (5, 6)

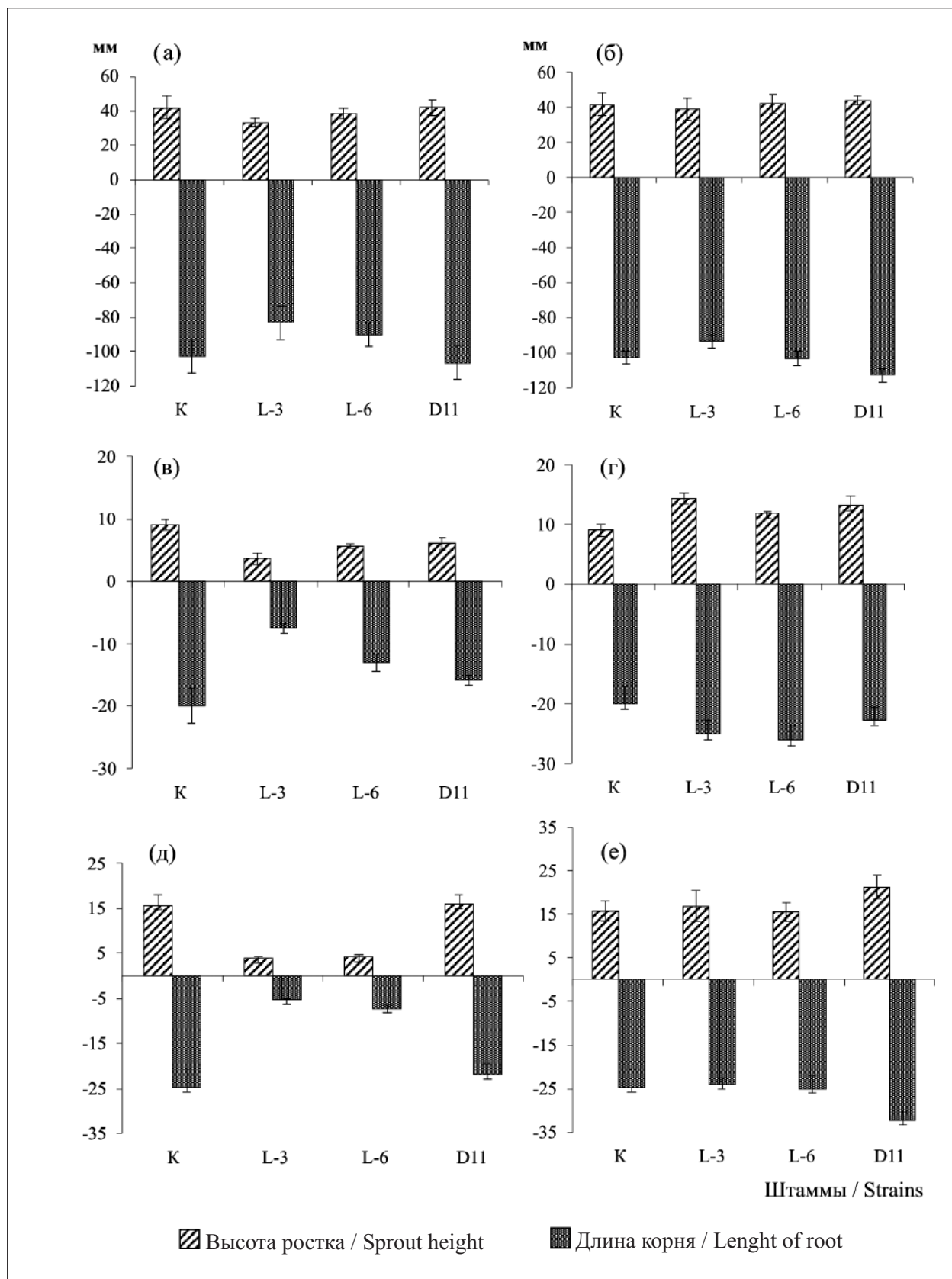


Рис. 2. Линейный рост проростков пшеницы яровой (а и б), клевера паннонского (в и г), горчицы белой (д и е) в зависимости от обработки исходной формой *Trichoderma* spp. (в и д), разведениями 1:10 (а, г, е) и 1:100 (б). К – контроль без обработки

Fig. 2. Linear growth of spring wheat seedlings (a and б), Pannonian clover (в and г), and white mustard (д and е) depending on treatment with the initial form of *Trichoderma* spp. (в and д), dilutions of 1: 10 (а, г, е) and 1: 100 (б). К – control without treatment

полностью устранялась, а для штамма D-11 по мере разбавления отмечены ростстимулирующие свойства (33–46%). Наибольший ростстимулирующий эффект штаммов L-3 и L-6 зафиксирован в отношении бобовой культуры *T. pannonicum*. Штамм D-11 при разведении стимулировал рост проростков горчицы и клевера. Чувствительность пшеницы в меньшей степени зависела от степени разведения исходной формы. Ростстимулирующий эффект *Trichoderma* spp. в отношении этой культуры не отмечен. Культуры *Trichoderma* выделяют разнообразные метаболиты, обладающие фитотоксичностью, наиболее известными из которых являются глиотоксин (эпидитиодикетопиперазин) и виридин (производное стирола) [12, 13]. Механизм токсичности данных веществ по отношению к растениям до конца не известен. Таксономически различные растения обладают разной чувствительностью к токсинам. Сообщалось, что при внесении в почву смеси *T. virens*-торф прорастание семян и рост проростков не снижались только у четырёх (подсолнечник, бобы, сахарная свекла и крестовник) из 29 видов культурных и сорных растений [20]. Стабильность действия токсинов определяется реакцией среды. Известно, что активность глиотоксина и виридина при низких значениях pH выше, чем при нейтральных [13]. Актуальную почвенную кислотность и различную фитотоксичность *Trichoderma* spp. в отношении таксономически разных культур необходимо учитывать в практической деятельности.

Таким образом, в лабораторных экспериментах изучены фитотоксичность и влияние на почвенный микробный комплекс нового биокомпозита на основе *Trichoderma* spp. Результаты показывают, что реакция почвенных МО может зависеть от количества внесённого интродукта, а также определяться исходным состоянием резидентного микробного сообщества. На растения концентрат суспензии исследованных штаммов оказывал фитотоксическое действие, степень проявления которого зависела от таксономической принадлежности тест-культуры. При разбавлении фитотоксичность уменьшалась, и проявлялись ростстимулирующие свойства *Trichoderma* spp. Полученные результаты говорят о достаточной экологической безопасности биокомпозитного препарата, при условии соблюдения рекомендуемых доз и учёта таких почвенных особенностей, как реакция почвенного раствора и степень обогащённости МО, участвующими в процессах трансформации ОБ.

References

1. Mukherjee P.K., Horwitz B.A., Herrera-Estrella A., Schmoll M., Kenerley C.M. *Trichoderma* research in the genome era // Ann. Rev. Phytopath. 2013. V. 51. P. 105–129. doi: 10.1146/annurev-phyto-082712-102353
2. Poveda J., Hermosa R., Monte E., Nicolás C. The *Trichoderma harzianum* Kelch protein ThKEL1 plays a key role in root colonization and the induction of systemic defense in Brassicaceae plants // Frontiers in Plant Science. 2019. V. 10. P. 1–14. doi: 10.3389/fpls.2019.01478
3. Lorito M., Woo S.L., Harman G.E., Monte E. Translational research on *Trichoderma*: from omics to the field // Annu. Rev. Phytopathol. 2010. V. 48. P. 395–417. doi: 10.1146/annurev-phyto-073009-114314
4. Mendoza-Mendoza A., Zaid R., Lawry R., Hermosa R., Monte E., Horwitz B.A., Mukherjee P.K. Molecular dialogues between *Trichoderma* and roots: role of the fungal secretome // Fungal Biology Reviews. 2018. V. 32. No. 2. P. 62–85. doi: 10.1016/j.fbr.2017.12.001
5. Zaidi N.W., Singh U.S. *Trichoderma* in plant health management // *Trichoderma: Biology and Applications* / Eds. P.K. Mukherjee, B.A. Horwitz, U.S. Singh, M. Mukherjee, M. Schmoll. Centre for Agriculture and Bioscience International, Oxfordshire-Boston, 2013. P. 230–247.
6. Blaszczyk L., Siwulski M., Sobieralski K., Lisiecka J., Jedryczka M. *Trichoderma* spp. – Application and prospects for use in organic farming and industry // Journal of Plant Protection Research. 2014. V. 54. No. 4. P. 310–317. doi: 10.2478/jppr-2014-0047
7. Rashad Y.M., Abdel-Azeem A.M. Recent progress on *Trichoderma* // Fungal Biotechnology and Bioengineering secondary metabolites / Eds. A.L. Hesham, R. Upadhyay, G. Sharma, C. Manoharachary, V. Gupta. Springer, Cham, 2020. P. 281–303.
8. Baker S.E., Perrone G., Richardson N.M., Gallo A., Kubicek C.P. Phylogenetic analysis and evolution of polyketide synthase-encoding genes in *Trichoderma* // Microbiology. 2012. V. 158. P. 147–154. doi: 10.1099/mic.0.053462-0
9. Tretyakova I.N., Park M.E., Baranova A.A., Lisetskaya I.A., Shuklina A.S., Rogozhin E.A., Sadykova V.S. Use of antimicrobial peptides secreted by *Trichoderma* micromycetes to stimulate embryogenic cultures of *Larix sibirica* // Russian Journal of Developmental Biology. 2018. V. 49. No. 6. P. 370–380. doi: 10.1134/S1062360419010053
10. Samson R.A., Houbraeken J., Thrane U., Frisvad J.C., Andersen B. Food and indoor fungi. Utrecht: The Netherlands, 2010. 246 p.
11. Aleksandrova A.V., Velikanov L.L., Sidorova I.I., Voronina E.Yu. Fungis of the genus *Trichoderma*. Zvenigorod Biological Station MSU // Trudy Zvenigorodskoy biologicheskoy stantsii imeni S.N. Skadovskogo. 2005. V. 4. P. 105–115 (in Russian).
12. Hermosa R., Cardoza R.E., Rubio M.B., Gutiérrez S., Monte E. Secondary metabolism and antimicrobial metabolites of *Trichoderma* // Biotechnology and biology

of *Trichoderma*. Elsevier, 2014. P. 125–137. doi: 10.1016/B978-0-444-59576-8.00010-2

13. Alimova F.K. Industrial use of fungi of the genus *Trichoderma*. Kazan: KGU im. V.I. Ulyanova-Lenina, 2006. 209 p. (in Russian).

14. Zhang F., Huo Y., Cobb A.B., Luo G., Zhou J., Yang G., Zhang Y. *Trichoderma* biofertilizer links to altered soil chemistry, altered microbial communities, and improved grassland biomass // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. P. 1–11. doi: 10.3389/fmicb.2018.00848

15. Zhang F.G., Zhu Z., Yang X.M., Ran W., Shen Q.R. *Trichoderma harzianum* T-E5 significantly affects cucumber root exudates and fungal community in the cucumber rhizosphere // *Appl. Soil. Ecol.* 2013. V. 72. P. 41–48. doi: 10.1016/j.apsoil.2013.05.016

16. Xiong W., Guo S., Jousset A., Zhao Q., Wu H., Li R., Shen Q. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome // *Soil Biology and Biochemistry*.

2017. V. 114. P. 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.07.016>

17. Sadykova V.S., Kurakov A.V., Kuvarina A.E., Rogozhin E.A. Antimicrobial activity of fungi strains of *Trichoderma* from Middle Siberia // *Applied biochemistry and microbiology*. 2015. V. 51. No. 3 P. 355–361. doi: 10.1134/S000368381503014X

18. Workshop on Microbiology / Ed. A.I. Netrusova. Moskva: Akademiya, 2005. 603 p. (in Russian).

19. Titova V.I., Kozlov A.V. Methods for assessing the functioning of soil microbocenosis involved in the transformation of organic matter: scientific and methodological manual. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskaya s.-kh. akademiya, 2012. 64 p. (in Russian).

20. Bailey B.A. Direct effects of *Trichoderma* and *Gliocladium* on plant growth and resistance to pathogens // *Enzymes, biological control and commercial application V.2.* / Eds. G.E. Harman, C.P. Kubicek. London: Taylor and Francis Ltd., 1998. P. 185–204.

Сравнительная характеристика роста и целлюлазной активности стрептомицетов на различных субстратах

© 2021. И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
 Я. И. Назарова¹, н. с., к. б. н., Н. А. Боков^{1,3}, магистрант,
 Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
 610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
³Вятский государственный университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
 e-mail: irgenal@mail.ru

Сравнивали накопление биомассы и целлюлазную активность семи почвенных изолятов стрептомицетов при жидкофазном культивировании в минеральной среде с разными источниками углерода (1% об.): микрокристаллической целлюлозой (МКЦ), фильтровальной бумагой и соломой. Двухфакторный дисперсионный анализ полученных данных позволил установить, что на варьирование целлюлазной активности достоверное влияние ($P \geq 0,99$) оказывают как тип субстрата, так и штамм продуцента, а также взаимодействие этих факторов. На уровень накопления биомассы достоверно влиял только тип углеродного субстрата. Солома и МКЦ в качестве единственного источника углерода, обеспечили лучший рост стрептомицетов, по сравнению с фильтровальной бумагой. В зависимости от штамма показатель накопления биомассы характеризовался слабой изменчивостью: коэффициент вариации колебался в пределах 3,0–5,7%. За период роста (15 сут) наибольшим накоплением биомассы среди исследованных штаммов отличались культуры *Streptomyces* spp. К 7.5 (0,442–0,570 г) и Мб 2-3 (0,461–0,570 г). Продукция целлюлазы исследуемыми штаммами в тесте с реагентом на основе динитросалициловой кислоты (ДНС) характеризовалась существенно более высокими значениями при утилизации фильтровальной бумаги и соломы, чем при использовании МКЦ в качестве единственного источника углерода. Выявлена приуроченность отдельных стрептомицетов-целлюлолитиков к определённому субстрату, на котором они демонстрируют наибольшую ферментативную активность. Максимальную целлюлазную активность при росте на минеральной среде с добавлением соломы проявили штаммы *Streptomyces* spp. Мб 4-2 (577,53 усл. ед./ (10 мин · г)) и 1.3. (531,37 усл. ед./ (10 мин · г)). Максимальную активность при ферментации фильтровальной бумаги продемонстрировали штаммы *Streptomyces* spp. 1.5 и К 7.5. Индивидуальная приуроченность стрептомицетов к определённому углеродному субстрату имеет практическое значение при разработке технологий и препаратов для деструкции целлюлозосодержащих отходов сельскохозяйственных и лесоперерабатывающих предприятий.

Ключевые слова: целлюлоза, стрептомицеты, углеродные субстраты, целлюлаза.

Comparative characteristics of the growth and cellulase activity of streptomycetes on different substrates

© 2021. I. G. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-3319-2729, Ya. I. Nazarova¹ ORCID: 0000-0002-2945-5282,
 N. A. Bokov^{1,3} ORCID: 0000-0002-1000-1192, T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0002-6611-8349,
¹Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,
 166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,
²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
 of the Russian Academy of Sciences,
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
³Vyatka State University,
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: irgenal@mail.ru

We compared the accumulation of biomass and cellulase activity during liquid-phase cultivation of seven soil isolates of streptomycetes in a mineral medium with different carbon sources (1% vol.); microcrystalline cellulose (MCC), filter paper, straw. Two-factor analysis of the obtained data allowed us to establish that the variation of cellulase activity is significantly influenced ($P \geq 0,99$) by both the type of substrate and the producer strain, as well as the interaction of these factors. The level of biomass accumulation was significantly affected only by the type of carbon substrate. Straw

and MCC as the sole carbon source provided better growth of streptomycetes, compared to filter paper. Depending on the strain, the biomass accumulation index was characterized by low variability: the coefficient of variation ranged from 3.0 to 5.7%. During the growth period (15 days), the greatest accumulation of biomass among the studied strains was observed in the cultures of *Streptomyces* spp. K 7.5 (0.442–0.570 g), Mb 2-3 (0.461–0.570 g). The production of cellulases by the studied strains in the test with the DNC reagent was characterized by significantly higher values when using filter paper and straw than when using MCC as the only carbon source. It was revealed that individual streptomycetes-cellulolytics demonstrate the greatest enzymatic activity when they are confined to a certain substrate. The strains of *Streptomyces* spp. Mb 4-2 (577.53 cond. units/(10 min · g) and 1.3 (531.37 cond. units/(10 min · g) showed the maximum cellulase activity when growing on a mineral medium with the addition of straw. The maximum activity in the fermentation of filter paper was demonstrated by *Streptomyces* spp. 1.5 and K 7.5 strains. Individual attachment of streptomycetes to a certain carbon substrate is of practical importance in the development of technologies and preparations for the destruction of cellulose-containing waste from agricultural and timber processing enterprises.

Keywords: cellulose, streptomycetes, carbon substrates, cellulose.

Ежегодно в результате деятельности сельскохозяйственных, лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятий, ряда других производств накапливаются большие объёмы лигноцеллюлозных отходов, которые представляют собой одну из проблем загрязнения окружающей среды и нуждаются в эффективной переработке [1, 2]. Гидролиз лигноцеллюлозной биомассы осуществляется ферментным комплексом, включающим гемицеллюлазы, лигнолитические ферменты и целлюлазы [3]. Все целлюлазы имеют одинаковую химическую специфичность к 1,4-гликозидным связям, но они отличаются отношением к субстратам. Экзоглюканазы (ЕС 3.2.1.74) или целлобиогидролазы (1,4-β-D-глюканцеллобиогидролаза, ЕС 3.2.1.91), отщепляющие целлобиозу с конца полисахаридной цепи, обычно имеют высокую активность к кристаллической целлюлозе. Эндоглюканазы (ЕС 3.2.1.4) предпочитают аморфные участки целлюлозы и, в отличие от целлобиогидролаз, способны гидролизовать замещённую целлюлозу, например, карбоксиметилцеллюлозу и гидроксиметилцеллюлозу. Наконец, β-глюкозидаза (ЕС 3.2.1.21) расщепляет целлобиозу и другие растворимые полисахариды до глюкозы [3–5].

Биотехнологическое применение целлюлаз началось в сельском хозяйстве с их использования в производстве кормов. Разработаны технологии микробиологической конверсии отходов сельского хозяйства, пищевой и зерноперерабатывающей промышленности в высококачественные углеводно-белковые кормовые добавки и комбикорма [6, 7]. Получены опытные партии компостов на основе отходов с использованием целлюлолитических микроорганизмов [8]. В последнее время микроорганизмы-целлюлолитики стали всё чаще использоваться в качестве основы почвоулучшающих биопрепаратов для более эффективной трансформации содержащих

лигноцеллюлозу растительных полимеров в компоненты гумуса [9].

Первые исследования целлюлаз были в основном сосредоточены на ферментативном комплексе грибов [3, 4, 6]. Бактериальные целлюлазы стали активно изучаться относительно недавно и расцениваются как потенциальный источник для развития коммерческих производств из-за особых оптимумов активности и субстратной специфичности [5, 8]. Рядом преимуществ в развитии биотехнологических приёмов переработки целлюлозосодержащих субстратов могут обладать, благодаря своим уникальным особенностям, представители рода *Streptomyces*. Стрептомицеты – важная часть микробного сообщества в почве, ответственная за разложение и переработку широкого спектра природных полимеров. Целлюлолитическую активность не раз отмечали у представителей порядка Streptomycetales [10–13].

Цель настоящей работы – изучить рост и целлюлазную активность семи штаммов бактерий рода *Streptomyces* при жидкофазном культивировании с использованием различных по доступности источников углерода.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили изоляты стрептомицетов из почв подзоны южной тайги Европейского Северо-Востока. Культуры были выделены из почв лесных фитоценозов (*Streptomyces* sp. Mb 4-2; Mb 2-3; T2-a4), а также из ризосферы табака (*Nicotiana tabacum*), выращенного на окультуренной дерново-подзолистой почве в условиях искусственного климата (*Streptomyces* sp. K 7.5; 1.3; 1.5).

Стрептомицеты культивировали в жидкой питательной среде следующего состава (г/л): K_2HPO_4 – 2, NaCl – 2, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 1, $MnSO_4$ – 0,05, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,05, NH_4Cl – 2, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ – 2. В качестве единственного источника углерода использовали: микро-

кристаллическую целлюлозу (МКЦ), фрагментированные фильтровальную бумагу и солому в количестве 1% об. В колбы объёмом 250 мл с жидкой питательной средой (50 мл) вносили по 2 агаровых блока, диаметром 10 мм, вырезанных из 5-суточных газонов стрептомицетов на овсяном агаре, выращенных при 28 °С. Культивирование проводили стационарно в течение 15 сут при 28 °С. Биомассу бактерий измеряли гравиметрически после центрифугирования в течение 10 мин при 7000 об./мин и высушивания при 105 °С до постоянного веса. В надосадочной жидкости спектрофотометрически (540 нм) определяли целлюлазную активность с реактивом на основе динитросалициловой кислоты (ДНС) [14]. Активность фермента выражали в усл. ед./ (10 мин · г биомассы бактерий).

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statgraphics. В таблицах приведены средние значения из трёх повторений и их стандартные ошибки при $P \geq 0,99$.

Результаты и обсуждение

При жидкофазном культивировании стрептомицетов с различными по биодоступности целлюлозосодержащими субстратами значительных различий по накоплению биомассы между штаммами в большинстве случаев не выявлено. Показатель накопления биомассы характеризовался слабой изменчивостью – коэффициент вариации не превышал 3,0–5,7% (табл. 1). Показано, что в среднем для данной выборки культур более эффек-

тивно утилизируются МКЦ и фильтровальная бумага, чем солома.

Так, уровень накопления биомассы на фильтровальной бумаге был близок к накоплению биомассы на МКЦ и на 20% выше, чем на соломе. Наилучшим ростом на среде с фильтровальной бумагой в качестве единственного источника углерода характеризовались штаммы *Streptomyces* sp. К 7.5. и Мб 2-3. Вместе с тем, один из штаммов *Streptomyces* sp. 1.3, на среде с МКЦ рос достоверно лучше (0,574 г), чем при утилизации других исследуемых субстратов (0,456–0,548 г). На соломе наибольшей биомассой достоверно отличался от других штамм *Streptomyces* sp. Т2а-4 (0,484г). Эти результаты позволили предположить существование у отдельных культур стрептомицетов определённых трофических предпочтений. Для проверки данной гипотезы был проведён двухфакторный дисперсионный анализ полученных экспериментальных данных (табл. 2).

Результаты анализа подтвердили преобладающее влияние на варьирование значений биомассы фактора «субстрат» ($F = 40,51$; $p < 0,0001$), но в то же время показали, что влияние другого фактора – штамма стрептомицета ($F = 0,48$; $p = 0,82$), а также влияние, обусловленное взаимодействием факторов «субстрат» × «штамм» ($F = 0,88$; $p = 0,57$), статистически оцениваются как недостоверные.

Результаты определения целлюлазной активности стрептомицетов в зависимости от типа целлюлозосодержащего субстрата представлены в таблице 3.

Ферментативная активность характеризовалась в среднем на порядок более высокими

Таблица 1 / Table 1

Биомасса стрептомицетов при жидкофазном росте в среде с разными целлюлозосодержащими субстратами / Biomass of streptomycetes during liquid-phase growth in an environment with different cellulose-containing substrates

Штамм Strain	Воздушно-сухая масса (г), среда с субстратами: Air-dry mass (g) on medium with substrates:		
	МКЦ MCC	фильтровальная бумага / filter paper	солома straw
<i>Streptomyces</i> sp. К 7.5	0,487±0,017	0,570±0,028	0,442±0,007
<i>Streptomyces</i> sp. Мб 2-3	0,532±0,08	0,570±0,008	0,461±0,015
<i>Streptomyces</i> sp. Мб 4-2	0,522±0,078	0,547±0,008	0,451±0,01
<i>Streptomyces</i> sp. Т2а-4	0,511±0,077	0,530±0,009	0,484±0,005
<i>Streptomyces</i> sp. 1.10	0,556±0,02	0,552±0,002	0,455±0,014
<i>Streptomyces</i> sp. 1.3	0,574±0,02	0,526±0,006	0,456±0,011
<i>Streptomyces</i> sp. 1.5	0,508±0,042	0,542±0,01	0,444±0,002
Среднее / Mean value	0,527	0,548	0,456
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	5,7	3,1	3,0

Таблица 2 / Table 2

Дисперсионный анализ влияния субстрата, штамма и их взаимодействия на рост и целлюлазную активность стрептомицетов
Dispersion analysis of the effect of the substrate, strain and their interaction on the growth and cellulase activity of streptomycete

Источник варьирования Source of variation	df	SS	F	p
Накопление биомассы / Biomass accumulation				
Субстрат (фактор А) / Substrate (factor A)	2	0,0910286	40,51	< 0,0001*
Штамм (фактор В) / Strain (factor B)	6	0,00322148	0,48	0,8210
Взаимодействие факторов А×В Interaction of factors А×В	12	0,0118147	0,88	0,5763
Целлюлазная активность / Cellulase activity				
Субстрат (фактор А) / Substrate (factor A)	2	462685	432,31	< 0,0001*
Штамм (фактор В) / Strain (factor B)	6	283804	88,39	< 0,0001*
Взаимодействие факторов А×В Interaction of factors А×В	12	590408	91,94	< 0,0001*

Примечание: df – число степеней свободы, SS – сумма квадратов, F – критерий Фишера, p – уровень значимости.
* – Влияние фактора на варьирование признака достоверно при данном уровне значимости.

Note: df is the number of degrees of freedom, SS is the sum of squares, F is the Fisher criterion, and p is the significance level. * – The influence of the factor on the variation of the trait is significant at this level of significance.

Таблица 3 / Table 3

Целлюлазная активность стрептомицетов при жидкофазном культивировании в среде с разными целлюлозосодержащими субстратами
Cellulase activity of streptomycetes during liquid-phase cultivation in a medium with different cellulose-containing substrates

Штамм Strain	Целлюлазная активность, усл. ед./ (10 мин · г) (среда с субстратами): Cellulase activity, standard units/(10 min · g) in medium with substrates:		
	МКЦ MCC	фильтровальная бумага filter paper	солома straw
<i>Streptomyces</i> sp. К 7.5	41,43±3,25	313,42±78,09*	212,95±4,79
<i>Streptomyces</i> sp. Мб 2-3	75,19±11,28	264,01±10,16*	119,90±6,84
<i>Streptomyces</i> sp. Мб 4-2	86,80±13,02	277,08±2,45	577,53±14,39*
<i>Streptomyces</i> sp. Т2а-4	218,56±14,3	193,84±7,97	247,72±5,76
<i>Streptomyces</i> sp. 1.10	48,1±15,56	234,94±0,38	326,72±6,77*
<i>Streptomyces</i> sp. 1.3	152,68±2,03	322,80±2,79	531,37±27,25*
<i>Streptomyces</i> sp. 1.5	30,76±0,16	330,09±8,93*	132,38±25,10
Среднее / Mean value	93,36	276,60	306,94
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	73	18	59

Примечание: * – приуроченность штамма к определённому субстрату.

Note: * – affinity of the strain to specific substrate.

значениями при росте стрептомицетов в минеральной среде с добавлением таких субстратов, как солома (306,94 усл. ед./ (10 мин · г)) и фильтровальная бумага (276,6 усл. ед./ (10 мин · г)), чем при росте в среде с МКЦ (93,36 усл. ед./ (10 мин · г)). Отдельные штаммы различались между собой по величине продукции целлюлазы гораздо значительнее, чем по накоплению биомассы. Более выраженной оказалась и изменчивость целлюлазной активности у отдельных штаммов в зависимости от вида субстрата. Если при росте стрепто-

мицетов в среде с фильтровальной бумагой коэффициент вариации значений целлюлазной активности (18%) характеризует слабую изменчивость признака, то при росте в среде с соломой он увеличился более чем втрое (59%) для этой же выборки культур микроорганизмов. Максимальное варьирование показателя продукции целлюлазы (73%) наблюдали при выращивании стрептомицетов в среде с МКЦ в качестве единственного источника углерода.

По показателю целлюлазной активности при росте на соломе в качестве единственного

источника углерода лидировали культуры *Streptomyces* spp. Мб 4-2 (577,53 усл. ед./ (10 мин · г)) и 1.3 (531,37 усл. ед./ (10 мин · г)). При разрушении фильтровальной бумаги выделились штаммы *Streptomyces* sp. К 7.5 (313,42 усл. ед./ (10 мин · г)), *Streptomyces* sp. 1.3 (322,80 усл. ед./ (10 мин · г)), *Streptomyces* sp. 1.5 (330,09 усл. ед./ (10 мин · г)). МКЦ наиболее активно ферментировали *Streptomyces* sp. Т2а-4 (218,56 усл. ед./ (10 мин · г)) и *Streptomyces* sp. 1.3 (152,68 усл. ед./ (10 мин · г)). Таким образом, штамм *Streptomyces* sp. 1.3 показал достаточно высокую целлюлазную активность (от 152,68 до 531,37 усл. ед./ (10 мин · г)) на всех субстратах, исследованных в работе.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа полученных данных установлено достоверное влияние на варьирование величины целлюлазной активности фактора «штамм» ($F = 88,39; p < 0,0001$) и взаимодействия факторов «субстрат» × «штамм» ($F = 91,94; p < 0,0001$). Однако наибольший вклад в общее варьирование признака, как и в случае с варьированием биомассы, внёс фактор «субстрат» ($F = 432,31; p < 0,0001$). Влияние субстрата на целлюлазную активность стрептомицетов в 4,9 раза превосходило влияние индивидуальных физиолого-биохимических особенностей штамма и в 4,7 раза – влияние взаимодействия исследуемых факторов.

Сопоставление полученных результатов с литературными данными [15, 16] подтвердило факт приуроченности стрептомицетов-целлюлолитиков к определённому субстрату, на котором они демонстрируют наибольшую ферментативную активность. Шесть из семи протестированных штаммов стрептомицетов показали индивидуальную приуроченность к определённому углеродному субстрату, и только целлюлазная активность изолята *Streptomyces* sp. Т2а-4 характеризовалась близкими значениями при росте на МКЦ, фильтровальной бумаге и соломе. Штаммы *Streptomyces* spp. К 7.5, Мб 2-3 и 1.5 продемонстрировали наиболее высокую целлюлазную активность при ферментации фильтровальной бумаги, а штаммы *Streptomyces* spp. Мб 4-2, 1.10 и 1.3 – при ферментации соломы. Индивидуальную приуроченность стрептомицетов к определённому углеродному субстрату необходимо учитывать в практической деятельности при разработке технологий и препаратов для деструкции целлюлозосодержащих отходов.

Работа выполнена в рамках государственных заданий № 0767-2019-0090 «Изучить потенциал полифункционального действия мицелиальных микроорганизмов в региональных типах почв с целью создания новых препаратов для повышения адаптивности и экологической безопасности растениеводства и защиты окружающей среды от загрязнений» и № 0414-2018-0003 «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги».

References

1. Isikgorand F.H., Becer C.R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers // *Polymer Chemistry*. 2015. V. 6. No. 25. P. 4497–4559. doi: 10.1039/C5PY00263J
2. Deswal D., Sharma A., Gupta R., Kuhad R.C. Application of lignocellulolytic enzymes produced under solid state cultivation conditions // *Bioresource Technology*. 2012. V. 115. P. 249–254. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.023
3. Sukumaran R.K., Singhania R.R., Pandey A. Microbial cellulases-production, applications and challenges // *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2005. V. 64. No. 11. P. 832–844.
4. Miettinen-Oinonen A., Paloheimo M., Lantto R., Suominen P. Enhanced production of cellobiohydrolases in *Trichoderma reesei* and evaluation of the new preparations in biofinishing of cotton // *Journal of Biotechnology*. 2005. V. 116. No. 3. P. 305–317. doi: 10.1016/j.jbiotec.2004.10.017
5. Sadhu S., Maiti T.K. Cellulase production by bacteria: a review // *British Microbiology Research Journal*. 2013. V. 3. No. 3. P. 235–258. doi: 10.9734/BMRJ/2013/2367
6. Han Y.W., Anderson A.W. The problem of rice straw waste a possible feed through fermentation // *Economic Botany*. 1974. V. 28. No. 3. P. 338–344. doi: 10.1007/BF02861429
7. Bellamy W.D. Production of single-cell protein for animal feed from lignocellulose wastes // *Ruminant nutrition: selected articles from the world animal review*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Accessed. 2020. V. 30 [Internet resource] <http://www.fao.org/3/x6512e/X6512E12.htm> (Accessed: 09.04.2021).
8. Shweta A. Cellulases of bacterial origin and their applications: A review // *International Journal of Science and Research*. 2012. V. 3. P. No. 10. 1652–1655.
9. Zhang F., Huo Y., Cobb A.B., Luo G., Zhou J., Yang G., Zhang Y. *Trichoderma* biofertilizer links to altered soil chemistry, altered microbial communities, and improved grassland biomass // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. P. 1–11. doi: 10.3389/fmicb.2018.00848

10. MacKenzie C.R., Bilous D., Schneider H., Johnson K.G. Induction of cellulolytic and xylanolytic enzyme systems in *Streptomyces* spp. // Applied and Environmental Microbiology. 1987. V. 53. No. 12. P. 2835–2839. doi: 10.1128/aem.53.12.2835-2839.1987
11. Saini A., Aggarwal N.K. Enhanced endoglucanase production by soil inhabiting *Streptomyces* sp. strain NAA9 using lignocellulosic biomass // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2019. V. 41. No. 13. P. 1630–1639. doi: 10.1080/15567036.2018.1549138
12. Takasuka T.E., Book A.J., Lewin G.R., Currie C.R., Fox B.G. Aerobic deconstruction of cellulosic biomass by an insect-associated *Streptomyces* // Scientific Reports. 2013. V. 3. Article No. 1030. doi: 10.1038/srep01030
13. Saini A., Aggarwal N.K., Sharma A., Yadav A. Actinomycetes: a source of lignocellulolytic enzymes // Enzyme Research. 2015. Article No. 279381. doi: 10.1155/2015/279381
14. Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar // Analytical Chemistry. 1959. V. 31. No. 3. P. 426–442. doi: 10.1021/ac60147a030
15. Alam M.Z., Sultana M. Isolation, identification and characterization of four cellulolytic actinomycetes and their cellulases // Chittagong University Journal of Biological Sciences. 2013. V. 6. P. 159–173. doi: 10.3329/cujbs.v6i1-2.17241
16. Alam M.Z., Manchur M.A. Anwar isolation, purification, characterization of cellulolytic enzymes produced by the isolate *Streptomyces omiyaensis* // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2004. V. 7. P. 1647–1653.

Влияние микробиологических препаратов на урожайность яровой мягкой пшеницы

© 2021. И. Ю. Иванова, к. с.-х. н., с. н. с., Д. А. Дементьев, к. с.-х. н., н. с.,
Чувашский НИИСХ – филиал ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока,
429911, Россия, Чувашская Республика, Цивильский район,
пос. Опытный, ул. Центральная, д. 2,
e-mail: m35y24@yandex.ru, tymondem@mai.ru, chniish@mail.ru

Ежегодное использование огромного количества различных пестицидов для защиты растений от болезней, вредителей и сорняков, а также использование химических солей минеральных удобрений с целью получения большего количества урожая лучшего качества является одним из элементов вырождения и массовой гибели макро-, мезо-, микрофлоры и фауны почвы. Нарушается баланс в процессе минерализации почвы и гумификации органических остатков. Это приводит к деградации плодородного слоя почвы, потере активного гумуса, сокращению мощности гумусового слоя. Как один из вариантов сокращения использования протравителей, фунгицидов и удобрений, предлагается использование микробиологических удобрений на основе штаммов живых микроорганизмов и их спор.

На экспериментальной базе Чувашского научно-исследовательского института изучалось влияние микробиологических препаратов на биометрические показатели, урожайность и экономическую эффективность возделывания яровой мягкой пшеницы сорта Московская 35. Наибольшую прибавку урожая в среднем за 2 года дало совместное использование препаратов на основе азотофиксирующих и фосфатмобилизирующих микроорганизмов – до 1,5 т/га. При этом, затраты на биоудобрения составили 1,9–5,4% от общей структуры затрат. Рентабельность возделывания возросла от 14,4% при использовании только одного штамма микроорганизмов, до 43,5% при использовании 2-х видов микробиологических удобрений, в сравнении с контролем.

Ключевые слова: микробиологические удобрения, стимуляторы роста, яровая мягкая пшеница, урожайность.

Influence of microbiological preparations on yield of spring soft wheat

© 2021. I. U. Ivanova ORCID: 0000-0002-0792-1721
D. A. Dementiev ORCID: 0000-0002-8571-8059

Chuvash Agricultural Research Institute – Branch of FARC of North-East,
2, Centralnaya St., Opitny, Tsivilsk District, Chuvash Republic, Russia, 429911,
e-mail: m35y24@yandex.ru, tymondem@mai.ru, chniish@mail.ru

Thousands of tons of chemical products are used annually in the world industrial production of agricultural products, both mineral fertilizers and toxic chemicals, aimed at combating diseases, pests and weeds. These chemicals actively influence not only the object of the struggle, but also the soil flora and fauna. The inhabitants of the soil, which loosen the soil, as well as the microorganisms involved in the processes of humification and mineralization of humus, are dying. The vacant ecological niches are occupied by organisms pathogenic for plants. This leads to the need to apply disinfectants and fungicides in even larger quantities.

One way to break this destructive chain is to replace chemical fungicidal drugs with microbiological ones. In these preparations, microorganisms are natural competitors of phytopathogens, which have an antibiotic effect, protecting the cultivated crop from diseases. In addition, these microorganisms are able to assimilate free nitrogen of the air, supplying them with plants and soil, transfer inaccessible phosphorus compounds to plants that are readily available for plants, produce growth stimulants and other biologically active substances that positively affect the growth, development and productivity of the crop. Also, the soil is saturated with microflora useful for the soil and plants.

On the experimental base of the Chuvash Research Institute of Agriculture, the effect of microbiological preparations on biometrics, yield and economic efficiency of cultivation of spring soft wheat varieties Moskovskaya 35 was investigated. The greatest increase in yield on average for 2 years was given by the joint use of preparations based on nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing microorganisms up to 1.5 ton/ha. At the same time, the cost of bio-fertilizers amounted to 1.9–5.4% of the total cost structure. The profitability of cultivation increased from 14.4% with the use of only one strain of microorganisms, up to 43.5% with the use of 2 types of microbiological fertilizers, in comparison with the control.

Keywords: microbiological fertilizers, growth stimulants, spring soft wheat, yield.

В последние годы при производстве сельскохозяйственной продукции всё чаще возникает вопрос получения экологически чистой продукции. Причин этому много: покупатель требует урожая, полученного с минимальным применением химических средств; эффективные пестициды и удобрения становятся всё дороже [1]; химическая нагрузка на окружающую среду приводит к значительному сокращению разнообразия экоценозов, а в почве гибнут остатки макро-, мезо- и микроорганизмов, что приводит к её интенсивной деградации и ускорению опустынивания сельскохозяйственных угодий [2–4]. По этим причинам многие производители начали отходить от традиционных методов возделывания сельскохозяйственных культур и принялись испытывать на посевах и посадках биологические препараты, отличающиеся достаточно большим разнообразием. Среди этого многообразия особую нишу занимают препараты на основе штаммов микроорганизмов (МО) имеющие различные свойства и назначения. В природе встречаются микроорганизмы, приносящие существенный вред сельскохозяйственным растениям, например, грибы рода *Fusarium*. Их действие в растениях нарушает ход естественных процессов метаболизма, включая фотосинтез, меняет химический состав растений, в первую очередь, белковый [5]. Используемые штаммы, согласно заявлению производителей, вступая в симбиотическую связь с растением при обработке посевного материала или вегетативных органов и семенного материала могут составить полноценную конкуренцию болезнетворным МО, вытесняя их с заселяемой площади органов растений. Иные применяемые штаммы используют выделения продуктов жизнедеятельности в качестве антибиотической среды для МО, не принадлежащих к данному виду, подавляя их развитие, тем самым защищая растения от патогенных грибов и бактерий [6]. Кроме того, подобные выделения могут воздействовать на растение симбионт как фитогормоны и органические соединения, влияющие на рост и развитие растения [7, 8]. Также активное распространение получили МО, способствующие усвоению газообразного азота из воздуха и переводу его в биологическую форму [9]. Их действие схоже с клубеньковыми бактериями бобовых растений, но, в отличие от них, эти МО могут заселять любые семейства растений. В большинстве почв содержатся большие запасы фосфора в недоступной для растений форме. Это способствовало созданию

микробиологических удобрений, обладающих фосфатмобилизирующими свойствами почвенных бактерий, то есть способствующих растворению минералов в силикатной форме, с последующим высвобождением фосфора и калия из сложных соединений с переводом их в доступные для растения формы [10, 11].

Все эти достижения в области микробиологических удобрений способствуют существенному снижению химической нагрузки на почву и окружающую среду, так как позволяют значительно сократить использование фунгицидов и протравителей, а также снизить применение азотных и фосфорных удобрений. Научные и исследовательские данные показывают, что микробиологические препараты положительно влияют на экономическую составляющую производства зерновых [12].

В опытах была поставлена цель – оценить эффективность микробиологических удобрений на основе различных штаммов микроорганизмов на яровой пшенице.

Задачей исследования является определение действия различных микробиологических удобрений на урожайность и качество яровой пшеницы.

Объекты и методы исследования

Объектом исследований являются растения яровой пшеницы сорта Московская 35, репродукции элита. Размещение вариантов внутри повторений – систематическое. Размещение повторений в опыте двухъярусное.

Количество вариантов в опыте 4. Повторность четырёхкратная, каждый вариант составляет 18 м², общая площадь под опытом – 288 м². В опытах применялись препараты на основе следующих живых клеток и спор бактерий: *Azotobacter chroococcum* (2 штамма от разных производителей); *Bacillus polymyxa*; *Bacillus subtilis*; *Bacillus mucilaginosus*.

Схема опыта

Вариант 1. Контроль (St) Фон: N₁₅P₁₅K₁₅

Вариант 2. N₁₅P₁₅K₁₅ + бактериальное удобрение (БУ) на основе *Azotobacter chroococcum* (500 мл/т семян) + БУ на основе *Bacillus polymyxa* (500 мл/т семян) + БУ на основе *B. polymyxa* (1 внекорневая подкормка 400 мл/га) + БУ на основе *A. chroococcum* (2-я внекорневая подкормка 400 мл/га)

Вариант 3. N₁₅P₁₅K₁₅ + БУ на основе *Bacillus subtilis* (1 л/т семян при протравливании) + БУ на основе *B. subtilis* (1 внекорневая подкормка 1 л/га) + БУ на основе *B. subtilis* (2 внекорневая подкормка 1 л/га).

Вариант 4. $N_{15}P_{15}K_{15}$ + БУ на основе *Bacillus mucilaginosus* (2 л/т семян) + БУ на основе *Azotobacter chroococcum* (2 л/т семян) + БУ на основе *A. chroococcum* (1 внекорневая подкормка 1 л/га) + БУ на основе *B. mucilaginosus* (2 внекорневая подкормка 1 л/га).

Во избежание конфликта интересов производителей марки препаратов и наименования производителей не указываются. Схема и дозировка применялись согласно рекомендациям производителей препаратов.

Улучшением азотного питания с помощью *Azotobacter chroococcum* занимался ещё академик С.П. Костычев в начале 30-х годов прошлого столетия. Было замечено, что, поселяясь в ризосфере сельскохозяйственных культур, микроорганизм способен не только вести фиксацию газообразного азота, улучшая азотное питание растения, но и вырабатывать биологически активные соединения типа стимуляторов роста и витаминов [13, 14]. Была установлена [15] антибиотическая активность фунгистического вещества – метилового эфира алифатической тетраеновой кислоты, который производили отдельные штаммы азотобактер, против многих фитопатогенных грибов. Недостатком данной бактерии являются требования, предъявляемые к среде обитания. Для полноценного развития и размножения ей требуются хорошо окультуренные, плодородные почвы. На бедных почвах бактерия быстро погибает, в связи с чем эффект от её присутствия сводится к минимуму.

Бактерии рода *Bacillus* являются активными продуцентами различных антибиотических веществ. *Bacillus polymyxa* – факультативный аэроб, восстанавливает нитраты. Также отмечено фосфатмобилизующее свойство данного рода бацилл. Данный вид МО может связывать азот воздуха и выделять стимуляторы роста растений [16, 17].

Bacillus subtilis поселяется в ризосфере растения, характеризуется активным выделением антибиотика, проявлением антагонистических свойств по отношению к различным фитопатогенам, продуцирует стимуляторы роста для инокулированных растений, за счёт чего может повышать иммунитет защищаемой культуры. Отдельные штаммы могут мобилизовать фосфор из органических, и неорганических соединений [18, 19].

Bacillus mucilaginosus обладает способностью растворять силикаты, апатиты, трикальцийфосфат, нуклеонат натрия и усваивать некоторое количество азота из воздуха [20].

Методика наблюдений и учётов в опыте: в исследованиях проводились фенологические наблюдения, учёт урожая сплошным методом, биометрический анализ растительных проб [21], математическая обработка данных [22].

Агротехника в опыте. Посев яровой пшеницы сорта Московская 35, репродукция суперэлита проведён в 2017 г. 3 мая, в 2018 г. 21 мая, на глубину 5–6 см, с нормой высева 6 млн семян или 260 кг/га. Всходы появились 18 мая в 2017 г. и 3 июня в 2018 г. Почва участка – тёмно-серая лесная среднесуглинистая.

Почва опытного участка характеризуется следующими показателями: на глубине пахотного слоя до 20 см содержание гумуса по Тюрину $5,8 \pm 0,5$ %; pH_{KCl} $5,5 \pm 0,2$; подвижный фосфор по P_2O_5 – 273 ± 29 мг/кг; обменный калий по K_2O – 111 ± 17 мг/кг; сумма поглощённых оснований – $16,7 \pm 1,4$ мг-экв./100 г; гидролитическая кислотность $3,6 \pm 0,4$ мг-экв./100 г почвы. Заключение по химическому составу почвы выдано Федеральным государственным бюджетным учреждением государственной центр агрохимической службы «Чувашский».

Предшественник – чистый пар. Обработка почвы: основная обработка – дискование на глубину 10–12 см (БДМ-3х4), ранневесеннее боронование (закрытие влаги) на глубину 4–5 см (БЗТС-1,0), предпосевная культивация на глубину 5–6 см (Паук-6,0), посев на глубину 5–6 см (СЗ-3,6), прикатывание. Предпосевное внесение NPK по 37,5 кг/га в действующем веществе. Перед посевом семена протравили согласно схеме опыта. Затем были проведены 2 внекорневые обработки, с рекомендованными дозами микробиологических удобрений.

Агрометеорологические условия вегетационного периода 2017–2018 годов. В 2017 г. рост и развитие сельскохозяйственных культур происходили при избытке осадков и пониженном температурном режиме в начале вегетации (май и июнь) и затем близкого к среднегодовой норме в остальной вегетационный период. За период активной вегетации растений (май–август) средняя температура воздуха составила $15,7$ °С, что ниже от многолетней на $0,7$ °С. Осадки – 139% многолетней нормы. Гидротермический коэффициент – 1,49.

В 2018 г. сев яровой пшеницы проводился значительно позже, чем в предыдущий год. Рост и развитие полевых культур осуществлялся в условиях недостатка влаги на фоне

высокого температурного режима в течение всего периода вегетации. Лишь в первой декаде июля выпали хорошие дожди – 35,4 мм (148% к многолетней декадной норме). Запасы продуктивной влаги в почве продолжали оставаться низкими. Гидротермический коэффициент за вегетацию составил 0,68. Уборка культуры проводилась в последней декаде августа.

Как 2017 г., так и 2018 г. по количеству осадков значительно отклонялись от средних многолетних. Однако засушливые условия сказываются на развитии МО более критично, чем условия переувлажнения.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены биометрические показатели растения яровой пшеницы в среднем за 2 года. Согласно полученным данным, основные элементы, влияющие на урожайность – количество зёрен с 1 колоса и их масса – имеют превышение над контролем по всем вариантам. Наибольшее отклонение количества зёрен с 1 колоса имелось в варианте 2 – 117,9% от контроля. Чуть меньше – в варианте 4, где использовалось два вида МО – 110,8% в сравнении с контролем. От-

клонение от контроля в варианте 3, с одним штаммом МО, составило менее 2%.

Все варианты с применением микробиологических препаратов ко количеству зёрен в колосе и массе зёрен с одного колоса превышали контроль. Наиболее продуктивные колосья по массе зерна были в варианте 4. Этот же вариант имел большее количество колосков в колосе.

В таблице 2 приведена хозяйственная урожайность культуры в зависимости от исследуемых препаратов. Динамика результатов показывает положительное влияние микробиологических удобрений на урожайность яровой пшеницы во всех вариантах. Варианты, в которых применялся комплекс микроорганизмов из двух различных штаммов (2 и 4) в 2018 г. существенно превысили контроль по прибавке урожайности. Вариант с одним штаммом микроорганизмов как в 2018 г., так и в 2017 г. не смог реализовать потенциал растений в большей степени, чем использование двух различных штаммов бактерий.

В таблице 3 приведены расчёты экономической эффективности использования микробиологических удобрений. Использование микробиологических удобрений во всех вариантах повышает рентабельность производства зерна. Эффект от одновременного применения

Таблица 1 / Table 1

Биометрические показатели яровой пшеницы перед уборкой в среднем за 2 года
Biometric indicators of spring wheat before harvesting on average for 2 years

№ варианта No. of option	Высота растений The height of plants		Длина колоса The length of ear		Количество колосков в колосе Number of spikelets per ear		Количество зёрен с колоса Number of grains per ear		Масса зёрен с 1 колоса Grain weight per 1 ear	
	см / cm	%	см / cm	%	шт. / pieces	%	шт. / pieces	%	г/g	%
1 Контроль Standard	97,7	100	9,5	100	15,4	100	25,4	100	1,15	100
2	94,9	97,1	9,1	95,8	15,4	100	29,95	117,9	1,3	113,0
3	96,3	98,6	9,2	97,4	14,6	95,1	25,85	101,8	1,25	108,7
4	98,8	101,1	9,6	101,1	15,7	102	28,15	110,8	1,45	154,9

Примечание / Note: % – процент от контроля / percent of the control.

Таблица 2 / Table 2

Влияние микробиологических удобрений на урожайность яровой пшеницы
Influence of microbiological fertilizers on the yield of spring wheat

№ варианта No. variants	Годы Years		Отклонение от стандарта The deviation from the standard			
			т/га / ton/ha		%	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018
1 Контроль / Standard	4,1	2,0	–	–	–	–
2	4,6	3,5	+0,54	+1,5	13,24	75
3	4,5	2,6	+0,46	+0,6	11,32	30
4	5,0	3,9	+0,94	+1,9	23,09	95
НСР ₀₅			+0,97	+1,1	23,7	55

Таблица 3 / Table 3

Экономическая эффективность применения микробиологических удобрений, в среднем за 2 года
Economic efficiency of application of microbiological fertilizers, average for 2 years

№ варианта No. variants	Выход зерна после доработки, т/га Grain yield after completion, ton/ha	Выручка, тыс. руб./га Revenue, thousand rubles/ha	Производст- венные затраты, тыс. руб./га Production costs, thousand rubles/ha	Уровень рентабель- ности Level of profita- bility, %	Затраты на биоудобрения в структуре произ- водственных затрат The cost of bio-fertilizers in the structure of production costs, %
1 Контроль Standard	3,0	19,7	19,1	3,03	0
2	4,1	27,6	19,9	41,61	1,9
3	3,6	23,5	20,1	17,48	3,4
4	4,5	30,4	21,1	46,51	5,4

двух групп бактерий позволил получить уровень рентабельности 41,61 и 46,51% в вариантах 2 и 4 соответственно. Использование только одного штамма (вариант 3) позволило получить рентабельность 17,5% в среднем за 2 года. При этом, затраты на биоудобрения в общей структуре производственных затрат наибольшие были в варианте 4,0–5,4%. Наименьшая в варианте 1,9–2,0%.

Заключение

Применение микробиологических удобрений в опытах способствует приросту урожайности яровой пшеницы Московская 35 (0,5–1,5 т/га). Лучшие результаты показывают микробиологические удобрения на основе бактерий, фиксирующих азот и мобилизующих фосфор, применяемые совместно в обработке семенного материала и на вегетирующих растениях. Увеличение дозы микробиологических удобрений увеличивает урожайность: в среднем, за 2017–2018 гг. вариант № 4 с дозировкой по 2 л/т семян и 1 л/га по листу увеличил урожайность яровой пшеницы на 4 ц/га в сравнении с вариантом № 2, где применяли по 500 мл/т семян и 400 мл/га при опрыскивании зелёной массы растений. Также урожайность возрастает и при применении только одного штамма МО (*Bacillus subtilis*), антагонистичного к различным фитопатогенам, выделяющему вещества антибиотиковой природы и стимуляторы роста, хотя результат ниже, чем в вариантах с двумя группами организмов и находится в пределах ошибки опыта. Предполагается, что сообщество различных МО, вступая в симбиотическое взаимодействие с растением в его ризосфере, оказывает синергический эффект на рост и развитие растения. Применение только одной группы МО не даёт растению тот спектр стимуляторов роста и ви-

таминов, получаемый культурой при применении 2 видов микробиологических удобрений.

Экономически применение исследуемых препаратов оправдывается увеличением рентабельности на 14,4% в сравнении с контролем в варианте с *Bacillus subtilis* до 37,6, и 43,5% в вариантах с комплексным применением 2-х видов удобрений. Это связано с ростом урожайности пшеницы.

За 2 года опытно-исследовательской работы мы пришли к выводу, что микробиологические удобрения показали значительную зависимость от климатических показателей. При влажном и прохладном вегетационном периоде воздействие исследуемых микроорганизмов снижается, так как для своего интенсивного развития они требуют комфортных температурных условий. При недостаточном количестве осадков интенсивность их деятельности так же существенно снижается и эффект от их использования сильно падает. Но всё же польза от использования подобных микроорганизмов несомненна. Их использование позволяет увеличить в почве численность естественных антагонистов для фитопатогенов растений, что, в последствии, позволит снизить потери от заболеваемости сельскохозяйственных культур. Так же, возможность этих бактерий связывать свободный азот из воздуха и увеличивать доступность соединений фосфора для питания растений позволит получить больший урожай при тех же затратах на минеральные удобрения.

References

1. Konstantinova S.P., Ivanova I.Yu. The influence of chemical and biological treatments on yield of potato // Priority directions of development of modern science young agricultural scientists. materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh

- uchenyh, posvyashchennoy 25-letiyu FGBU "Kaspiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut aridnogo zemledeliya". c. Solyonoe Zaymishche, 2016. P. 96–100 (in Russian).
2. Berestetskiy O.A., Wozniakowskya J.M., Dorosinskiy L.M. The biological basis of soil fertility. Moskva: Kolos, 1984. 287 p. (in Russian).
 3. Zvyagintsev D.G. Soil biology: a textbook. Moskva: MGU, 2005. 445 p. (in Russian).
 4. Karyagina L.A. Microbiological bases of soil fertility increase. Moskva: Nauka i tekhnika, 1983. 181 p. (in Russian).
 5. 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 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-006-015
 6. Haggag W.M. Isolation of bioactive antibiotic peptides from *Bacillus brevis* and *Bacillus polymyxa* against botrytis grey mould in strawberry // Archives of Phytopathology and Plant Protection. 2008. V. 41. No. 7. P. 477–491. doi: 10.1080/03235400600833704
 7. Martinez-Toledo M.V., Gonzalez-Lopez J., de la Rubia T., Ramos-Cormenzana A. Isolation and characterization of *Azotobacter chroococcum* from the roots of *Zea mays* // FEMS Microbiology Letters. 1985. V. 31. No. 4. P. 197–203. doi: 10.1016/0378-1097(85)90403-3
 8. Malik B.S., Paul S., Sharma R.K., Sethi A.P., Verma O.P. Effect of *Azotobacter chroococcum* on wheat (*Triticum aestivum*) yield and its attributing components // Indian Journal of Agricultural Sciences. 2005. V. 75. No. 9. P. 600–602.
 9. Lee I.Y., Seo W.T., Kim G.J., Kim M.K., Ahn S.G., Kwon G.S., Park Y.H. Optimization of fermentation conditions for production of exopolysaccharide by *Bacillus polymyxa* // Bioprocess Engineering. 1997. V. 16. No. 2. P. 71–75.
 10. Kozlov A.V., Kulikova A.H., Uromova I.P. Leaching products in the bacterial system "breed-culture" at biochemical degradation by silicate bacteria of diatomite, zeolite and bentonite // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2017. V. 19. No. 2–2. P. 284–288 (in Russian).
 11. Voronkov M.G., Kuznetsov I.G. Silicon in nature. Novosibirsk: Nauka, 1984. 155 p. (in Russian).
 12. Koryagina N.V., Koryagin Yu.V., Efremova S.Yu., Koryagina E.Yu. Microbiological preparations as ensuring the environmental friendliness of agricultural production // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2016. V. 30. No. 2. P. 179–184 (in Russian).
 13. Cherif-Silini H., Silini A., Yahiaoui B., Ouzari I., Boudabous A. Phylogenetic and plant-growth-promoting characteristics of bacillus isolated from the wheat rhizosphere // Annals of Microbiology. 2016. V. 66. No. 3. P. 1087–1097. doi: 10.1007/s13213-016-1194-6
 14. Ashraf A., Bano A., Ali S.A. Characterisation of plant growth-promoting rhizobacteria from rhizosphere soil of heat-stressed and unstressed wheat and their use as bio-inoculant // Plant Biology. 2019. V. 21. No. 4. P. 762–769. doi: 10.1111/plb.12972
 15. Pridachina N.N., Novogradskaya E.D., Kruglyak E.B. *Azotobacter chroococcum*, an organism producing a new antifungal antibiotic // Antibiotiki. 1982. V. 27. No. 1. P. 3–6 (in Russian).
 16. Shashikala A.R., Raichur A.M. Role of interfacial phenomena in determining adsorption of *Bacillus polymyxa* onto hematite and quartz // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2002. V. 24. No. 1. P. 11–20. doi: 10.1016/S0927-7765(01)00217-X
 17. Karpunina L.V., Mel'nikova U.Yu., Konnova S.A., Stadnik G.I. The study of the biological role of lectins of *Bacillus polymyxa* in the interaction with the carbohydrate fraction of wheat roots ecocomposite // Izvestiya Rossiiskoy akademii nauk. Seriya biologicheskaya. 2003. No. 3. P. 311–314 (in Russian).
 18. Abo Doma A., Shoaib R.M., Mohamed H.A. Exploration of modify genes expression in wheat via the enhancement of *Bacillus subtilis* // I Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2017. V. 8. No. 1. P. 1878–1886.
 19. Bulavenko L.V., Roy A.A., Kurdish I.K. Comparative characteristics of growth and phosphatability activity of *Bacillus polymyxa* and *Bacillus subtilis* // Visnik Odes'kogo nacional'nogo universitetu. Biologiya. 2001. V. 6. No. 4. P. 43–46 (in Russian).
 20. Chen S., Lian B., Liu C. Effect of *Bacillus mucilaginosus* on weathering of phosphorite and a preliminary analysis of bacterial proteins // Chinese Journal of Geochemistry – English Edition. 2008. V. 27. No. 2. P. 209–216.
 21. Batalova G.A., Sheshegova T.K., Starikov V.A. Methodical recommendations on ecological testing of agricultural crops on the example of grain. Kirov: GNU NIISKH Severo-Vostoka, 2013. 31 p. (in Russian).
 22. Moiseichenko V.F., Trifonova M.F., Zaveryukha A.X., Eshchenko V.E. Fundamentals of scientific research in agronomy: Textbook. Moskva: Kolos, 1996. 336 p.

Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью нейросетевого анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла

© 2021. С. С. Хрущев¹, к. б. н., с. н. с.,
 Т. В. Дрозденко², к. б. н., доцент, с. н. с.,
 Т. Ю. Плюснина¹, к. ф.-м. н., доцент, И. В. Тимофеев², студент,
 Д. А. Тодоренко¹, к. б. н., н. с., Е. И. Тихомирова³, д. б. н., профессор,
 Т. К. Антал^{1,2}, д. б. н., г. н. с.,
¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
²Псковский государственный университет,
 180000, Россия, г. Псков, площадь Ленина, д. 2,
³Саратовский государственный технический университет
 имени Гагарина Ю. А.,
 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,
 e-mail: taras_an@mail.ru, styx@biophys.msu.ru, tichomirova_ei@mail.ru

В настоящее время получают распространение методы выявления плохо формализуемых закономерностей в экспериментальных данных с помощью нейросетевых моделей. В данной работе разработан прототип нейросетевой модели для выявления действия тяжёлых металлов на фитопланктон по изменению формы индукционной кривой флуоресценции хлорофилла (ОИР кривой), которая может быть использована в автоматической системе биоиндикации состояния водоёмов. Предложенная модель апробирована на природном фитопланктоне из 9 водоёмов Псковской области, который подвергли долгосрочному воздействию солей кадмия и хрома (20 и 50 мкМ CdSO₄ и K₂Cr₂O₇) в лабораторных условиях. Модель позволяет выявить токсическое действие тяжёлых металлов с точностью до 90%, что указывает на перспективность применения данного подхода в экологическом мониторинге.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, водные экосистемы, фитопланктон, экологический мониторинг, нейронные сети, флуоресценция хлорофилла, фотосинтез.

Heavy metal toxicity detection in phytoplankton by using neural network analysis of chlorophyll fluorescence induction

© 2021. S. S. Khruschev¹ ORCID: 0000-0002-4714-6221¹
 T. V. Drozdenko² ORCID: 0000-0002-5553-2296² T. Yu. Plyusnina¹ ORCID: 0000-0002-0734-1727¹
 I. V. Timofeev² ORCID: 0000-0002-5862-2203² D. A. Todorenko¹ ORCID: 0000-0002-7344-0256¹
 E. I. Tikhomirova³ ORCID: 0000-0001-6030-7344³ T. K. Antal^{1,2} ORCID: 0000-0002-9690-8034^{1,2}
¹Lomonosov Moscow State University,
 GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,
²Pskov State University,
 2, Lenina Square, Pskov, Russia, 180000,
³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
 77, Politekhnicheskaya St., Saratov, Russia, 410054,
 e-mail: taras_an@mail.ru, styx@biophys.msu.ru, tichomirova_ei@mail.ru

Application of artificial neural networks for identifying poorly formalized patterns in experimental data become widespread nowadays. In the present work, we elaborated a prototype of a model for detection of water contamination by heavy metals. The model is a fully connected neural network (multilayer perceptron) designed by using the Python programming language and the TensorFlow software (Keras). It is intended for application in environmental monitoring of natural water bodies using chlorophyll fluorescence measurements which are considered as highly informative ap-

proach for probing photosynthetic activity *in vivo* and *in situ*. Fluorescence rise induced by application of a strong light pulse to the dark-adapted plant or algae (the OJIP transient) reflects a stepwise transition of the photosynthetic electron transport chain from the oxidized to the fully reduced state. To provide a quantitative analysis of the OJIP transient, a JIP test was introduced whose parameters describe energy fluxes through the photosynthetic electron transport chain. Our model uses OJIP transients and/or JIP-test parameters, measured in phytoplankton communities, as input data. As a result, it determines the probability of water pollution by heavy metals. In order to test the model, phytoplankton samples were taken from 9 water bodies of Pskov region and then treated with chromium and cadmium under laboratory conditions. For that, phytoplankton samples were exposed to cadmium and chromium salts (CdSO_4 and $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) at two concentrations (20 and 50 μM) for three days, and OJIP curves were recorded and JIP-test parameters calculated at different stages of the experiment. In total, 419 curves were collected, and a whole dataset was analyzed. Results showed that accuracy of detecting the toxic effects of Cd^{2+} (after 2 or more hours of incubation) and $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (after 9 or more hours of incubation) by the model achieved 90%. The highly accurate determination of the toxicity of heavy metals indicates a promising prospect for the application of machine learning technology in environmental monitoring.

Keywords: heavy metals, aquatic ecosystems, phytoplankton, environmental monitoring, neural networks, chlorophyll fluorescence, photosynthesis.

Тяжёлые металлы (ТМ) являются одними из распространённых загрязнителей водных экосистем и представляют серьёзную угрозу для живых организмов. Вместе со сточными водами ТМ попадают в водоёмы, вызывая интоксикацию фитопланктона, который является первичным продуцентом и определяет состояние водной экосистемы в целом. Основным механизмом токсического действия ТМ обусловлен ингибированием ключевых метаболических процессов и деления клеток в результате взаимодействия с SH-содержащими соединениями и дисульфидными группами белков [1].

Физиологическое состояние фитопланктона отражает активность фотосинтеза. Воздействие ТМ на процесс фотосинтеза сопровождается снижением светопоглощательной способности, активности фотосинтетического электронного транспорта и фотофосфорилирования, скорости фиксации CO_2 и выделения O_2 . Тяжёлые металлы действуют также на ультраструктуру хлоропластов и вызывают деградацию фотосинтетических пигментов [2, 3]. Все эти изменения в конечном итоге приводят к снижению первичной продукции водных экосистем.

В промышленных сточных водах часто выявляются такие ТМ, как кадмий и хром, которые являются опасными токсикантами [4]. Воздействуя на первичные реакции фотосинтеза, кадмий и хром ингибируют электронный транспорт в фотосистеме 2 (ФС2) на донорной и акцепторной сторонах, снижают активность фотосистемы 1 (ФС1) и межсистемный электронный транспорт, скорость фиксации CO_2 [5–7].

Для раннего выявления загрязнения водоёмов ТМ необходимо разработать высокоэффективные методы мониторинга водных экосистем. Флуоресценция хлорофилла может

использоваться в качестве чувствительного индикатора состояния первичных реакций фотосинтеза, связанных с поглощением и преобразованием энергии света фитопланктоном [8, 9]. Разработано несколько методов оценки состояния фотосинтеза *in situ* по параметрам флуоресценции хлорофилла [10], в том числе по форме индукционной кривой быстрой флуоресценции хлорофилла с высоким временным разрешением (так называемая OJIP кривая) [11]. OJIP кривая отражает индуцированный сильным светом рост интенсивности флуоресценции от минимального уровня (F_0 , O) до полностью восстановленного состояния (P) через основные промежуточные этапы J и I [12]. Начальная фаза OJ длительною 2–3 мс соответствует восстановлению акцепторной стороны ФС2, в то время как последующая фаза JIP (150–300 мс) отражает последовательное восстановление пула пластохинонов и ФС1. Форма OJIP кривой обнаружила высокую чувствительность к воздействию стрессовых факторов. Использование математических имитационных моделей [13] позволило выяснить, какие основные процессы соответствуют отдельным стадиям индукционной кривой, однако пока не существует модели, позволяющей однозначно интерпретировать изменения этой кривой.

Нейросетевые модели зарекомендовали себя в качестве эффективного инструмента для выявления неявных плохо формализуемых закономерностей в экспериментальных данных. В последние десятилетия было предпринято несколько попыток использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для анализа OJIP кривых. Так, в работах [14–16] исследовано действие стрессовых факторов (засуха, недостаток минерального питания) на параметры флуоресценции хлорофилла для ряда сельскохозяйственных культур и разра-

ботаны нейросетевые модели, позволяющие идентифицировать фактор стресса по форме индукционной кривой.

Целью данной работы являлась разработка чувствительного метода анализа флуоресценции хлорофилла для выявления токсического действия тяжёлых металлов на природный пресноводный фитопланктон. В этой связи предложен и апробирован на обработанных солями кадмия и хрома образцах фитопланктона оригинальный метод анализа ОИР кривых с помощью ИНС.

Объекты и методы исследования

Отбор образцов фитопланктона. Исследования проводили осенью 2020 г. в разнотипных водоёмах Псковской области, в том числе, в озёрах (Псковско-Чудском, Тёплом, Калацком, Лесицком, Тиглицы), дельте р. Великой, р. Каменке и пруду р. Мирожки. Пробы фитопланктона объёмом 0,5 л для микроскопических исследований и 1–1,5 л для изучения фотосинтетической активности отбирали пластиковыми ёмкостями с поверхностного горизонта.

Обработка образцов фитопланктона. Образцы фитопланктона культивировали в колбах Эрленмейера объёмом 250 мл в люминестате при интенсивности света 50 мкмоль фотонов/(м²·с) с периодом освещения: 12 ч день; 12 ч ночь при температуре 20–22 °С. Для предотвращения оседания клеток и обогащения культуры углекислым газом содержимое колб периодически перемешивали.

В качестве токсикантов использовали соли кадмия (CdSO₄) и хрома (K₂Cr₂O₇). В каждую колбу вносили 200 мл образца фитопланктона и добавляли токсиканты в конечной концентрации 20 и 50 мкмоль/л. Обработанные образцы фитопланктона инкубировали в приведённых выше условиях в течение 3 сут.

Для исследования качественных и количественных характеристик фитопланктона пробы фиксировали 40% раствором формалина, затем концентрировали до 10 мл. Идентификацию микроводорослей производили с помощью микроскопа «Carl Zeiss Axio Lab A1» (Германия) и камеры Нажотта (0,05 мл); использовали определители, указанные в [17]. Численность клеток фитопланктона на 1 л пересчитывали по общеизвестной формуле. Для установления трофности водоёма вычисляли индекс трофности Миллиус [18]. Индекс сапробности рассчитывали по Пантле-Букк в модификации Сладечека [19].

Измерение ОИР кривых. Кинетику световой индукции флуоресценции хлорофилла (ОИР-кривые) регистрировали с помощью флуориметра «AquaPen-С AP-С 100» (Photon System Instruments, Brno, Чехия). Флуоресценцию индуцировали красным светом с длиной волны 630 нм в течение 2 с при плотности потока квантов 1000 мкмоль фотонов/(м²·с). Сигнал флуоресценции хлорофилла детектировался PIN-фотодиодом со светофильтром (667–750 нм) и максимальной чувствительностью в диапазоне флуоресценции хлорофилла *a*. Перед измерениями образцы фитопланктона адаптировали к темноте в течение 10 мин.

Анализ параметров флуоресценции хлорофилла с помощью нейронных сетей. Для выявления токсического действия солей ТМ на природный фитопланктон был создан ряд полносвязных нейросетевых моделей с прямой связью (многослойный перцептрон) с использованием языка программирования Python и пакета TensorFlow (Keras). Во всех моделях выходной слой состоял из единственного нейрона с сигмоидной функцией активации, выход которого интерпретировался как предсказание наличия ($\geq 0,5$) или отсутствия ($< 0,5$) токсического действия.

В качестве входных данных модели использовали либо величины интенсивности флуоресценции в отдельные моменты времени (30 мкс – 2 с) после включения света (456 значений – модели типа «С»), либо 23 параметра так называемого ИР-теста [11], рассчитанных по индукционной кривой с помощью программного обеспечения, встроенного во флуориметр «AquaPen-С AP-С 100» (модели типа «J»). Исходные данные нормализовывали таким образом, чтобы среднее по выборке значение каждого параметра было равно 0, а дисперсия – 1. В качестве целевой функции при обучении моделей использовали перекрёстную энтропию между фактическим наличием токсического действия и предсказанием модели. Обучение моделей проводили стохастическим методом адаптивной оценки моментов (Adam) в течение 200 эпох пакетами по 10 образцов.

Оценку точности предсказаний модели проводили методом скользящего контроля, реализованным с использованием пакета scikit-learn. Весь набор данных разбивался на 10 выборок одинакового размера с одинаковым соотношением контрольных и подвергшихся токсическому воздействию образцов, после чего каждая из 10 выборок использовалась для определения точности предсказания модели,

для обучения которой использовали остальные 9 выборок. Полученные результаты усредняли.

Были исследованы модели с разным числом скрытых слоёв (от 0 до 2 слоёв с активацией типа RELU) и разным числом нейронов в скрытых слоях. Показано, что точность предсказания модели с одним скрытым слоем существенно выше по сравнению с моделью без скрытых слоёв, однако добавление дополнительных слоёв не увеличивает точность предсказания. Оптимальное число нейронов в скрытом слое было определено равным 8, использование меньшего числа нейронов приводило к уменьшению точности предсказания модели, в то время как использование большего – не увеличивало точность.

Результаты и обсуждение

Общая характеристика фитопланктона.

Максимальное видовое богатство фитопланктона наблюдалось в пруду р. Мирожки и в открытой части Тёплого озера: по 84 таксона рангом ниже рода, минимальное – в озере Каляцкое – 47 (табл. 1). Основу флористического комплекса в исследованных водных объектах составляли представители отделов Bacillariophyta, Chlorophyta и Cyanobacteria, кроме пруда р. Мирожки, где вместо циано-

бактерий в видовом отношении доминировали эвгленовые водоросли. Общая численность осеннего фитопланктона изменялась от 1,8 до 73,0 млн кл./л. Наибольший вклад в численность вносили цианобактерии, доля которых (по количеству клеток) составляла 10,7–91,0% в зависимости от водоёма. Общая биомасса фитопланктона лежала в пределах 0,3–3,1 г/м³. Основу биомассы составляли диатомовые водоросли – до 73,4%. Согласно индексам трофности Миллиус, воды дельты р. Великой и Чудского озера относились к олиготрофному типу, а воды остальных исследованных водоёмов – к мезотрофному (табл. 1). Индекс сапробности по Пантле-Букк колебался от 1,65 до 2,32, что указывает на III класс качества изучаемых акваторий (умеренно загрязнённые).

Начальные значения максимального квантового выхода фотохимического преобразования энергии в ФС2 FV/FM во всех образцах фитопланктона были достаточно низкими (0,4–0,5, табл. 1) по сравнению со значениями, наблюдаемыми в оптимальных условиях роста (около 0,7). Это отражает низкую активность фитопланктона в период осенней депрессии. Частично низкие значения FV/FM могут быть обусловлены присутствием цианобактерий в образцах, доля которых в видовом составе составляла около 20%.

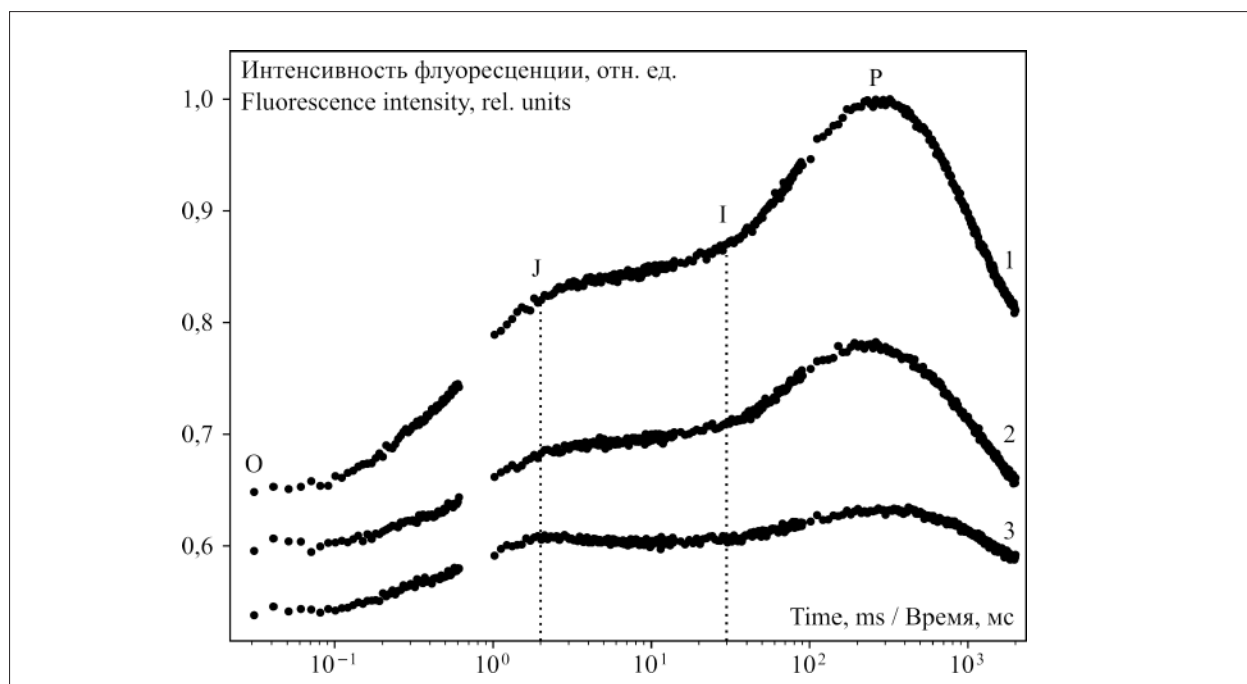


Рис. Индукционные кривые флуоресценции хлорофилла (OJIP кривые) в исследованных образцах фитопланктона. Показаны кривые, усреднённые по всем измерениям для всех исследованных проб при сроках инкубации от 9 до 71 ч в контроле (1), при действии CdSO₄ (2) и K₂Cr₂O₇ (3)

Fig. Induction curves of chlorophyll fluorescence (OJIP curves) of phytoplankton samples. Curves are averaged over all experiments for all samples: control (1), exposed to CdSO₄ (2), exposed to K₂Cr₂O₇ (3)

Таблица 1 / Table 1

Основные качественные и количественные характеристики фитопланктона и мест отбора проб
Key qualitative and quantitative characteristics of phytoplankton and sampling sites

Показатели Parameters	Пруд р. Мирожки Pond of the Mirozhka river	Дельта р. Великой Delta of the Velikaya river	Озеро Чудское Lake Chudskoe	Озеро Тёплое Lake Terploe	Озеро Калацкое Lake Kalatskoe	Озеро Лесицкое Lake Lesitskoe	Озеро Тиглицы Lake Tiglitsy
Общее число видовых таксонов фитопланктона, абс. The total number of species taxa of phytoplankton, abs.	84	46	64	84	47	72	65
Флористический комплекс Floristic complex	В-Chl-Eug	В-Chl-Cyan	В-Chl-Cyan	Chl-В-Cyan	Chl-В-Cyan	В-Chl-Cyan	Chl-В-Cyan
Общая N, млн кл./м ³ Total N, mln cells/m ³	1788,0	2322,9	2340,0	73040,0	5872,0	1990,0	24400,0
Общая В, г/м ³ / Total В, g/m ³	0,8	0,3	0,3	3,1	0,9	1,1	1,3
Индекс трофности Миллиуса Millius trophic index	42,4	32,7	32,7	56,3	43,8	45,8	47,5
Индекс сапробности по Пангле-Букк Pantle-Bukk saprobity index	2,13	2,32	2,17	1,90	1,65	1,99	1,92
F_v/F_m	0,440	0,525	0,341	0,433	0,389	0,376	0,417

Примечание: N – численность, В – биомасса; В-Chl-Eug – диатомово-хлорофитово-эвгленовый; В-Chl-Cyan – диатомово-хлорофитово-цианобактериальный; Chl-В-Cyan – хлорофитово-диатомово-цианобактериальный.

Note: N – number, В – biomass; В-Chl-Eug – diatom-chlorophytic-euglenic; В-Chl-Cyan – diatom-chlorophytic-cyanobacterial; Chl-В-Cyan – chlorophytic-diatom-cyanobacterial.

Таблица 2 / Table 2

Точность выявления токсического действия разных концентраций CdSO₄ и K₂Cr₂O₇ и отсутствия токсического действия в контроле для нейросетевых моделей
Precision of detecting toxic effects of different concentrations of CdSO₄ and K₂Cr₂O₇ and the absence of toxic effects in the control for neural network models

Токсикант Toxicant	Время инкубации, ч Incubation time, h	Концентрация токсиканта, мкМ Toxicant concentration, μM	Число измерений Number of measurements	Точность, % Precision, %			
				C1	C2	J1	J2
CdSO ₄	2–8	20	14	87	79	79	71
		50	14	93	79	93	100
	9–23	20	9	100	100	89	89
		50	9	100	100	89	89
	24–47	20	27	93	85	93	96
		50	28	93	86	79	82
	48–71	20	18	83	94	78	78
		50	17	88	82	88	88
K ₂ Cr ₂ O ₇	2–8	20	14	43	0*	64	14*
		50	14	64	0*	64	14*
	9–23	20	9	100	100	78	78
		50	9	100	100	100	100
	24–47	20	27	89	89	89	85
		50	27	100	100	100	96
	48–71	20	17	94	94	88	88
		50	16	100	100	94	100
Контроль Control	0–8	–	47	94	100	81	91
	9–23	–	17	82	94	71	94
	24–47	–	51	80	86	84	92
	48–71	–	35	66	71	71	83

Примечание: Данные сгруппированы по продолжительности инкубации проб с токсикантом. Приведено общее число экспериментов и доля правильных предсказаний нейросетевой модели при использовании плавающего контроля (перекрёстной проверки). * – Оценка получена с помощью модели, для обучения которой использовались все экспериментальные данные, кроме образцов, инкубированных с добавлением K₂Cr₂O₇ в течение 2–8 ч.

Note: The data are grouped according to the duration of incubation of samples with a toxicant. The total number of experiments and the proportion of correct predictions of the neural network model are shown using floating control (cross validation). * – The estimate was obtained using a model, which training was conducted excluding samples incubated with K₂Cr₂O₇ for 2–8 hours.

Анализ токсического воздействия кадмия и хрома на параметры флуоресценции фитопланктона. Усреднённые по всему эксперименту ОЛР кривые, соответствующие контрольным образцам фитопланктона и образцам, обработанным солями кадмия и хрома, приведены на рисунке. В контроле кривая характеризовалась двумя основными фазами индукции флуоресценции хлорофилла (ОJ и IP), в то время как фаза JI была в значительной степени подавлена, что отражает нарушение баланса между реакциями фотосинтетического электронного транспорта.

Такая форма кривой может отражать снижение активности ФС2 в период осенней депрессии фитопланктона, как упоминалось выше. Воздействие кадмия и хрома приводило

к снижению амплитуды максимальной переменной флуоресценции ОР и вклада фазы JIP в переменную флуоресценцию, что свидетельствует об уменьшении доли активных центров ФС2. Выявленное действие кадмия и хрома на ФС2 в образцах фитопланктона соответствует литературным данным [5, 20]. При этом воздействие хрома на параметры кривой было более выраженным по сравнению с кадмием, свидетельствуя о более сильном ингибиторном эффекте.

Для обучения нейросетевой модели из экспериментальных данных был сформирован набор, включающий 150 контрольных образцов со временем инкубации в колбах от 0 до 71 ч, и 269 образцов, инкубированных в присутствии токсикантов (CdSO₄ – 136, K₂Cr₂O₇ – 133) от 2 до 71 ч. Средняя точность выявления на-

личия либо отсутствия токсического действия ТМ составила $83,5 \pm 8,7\%$ для модели, использующей в качестве входных данных величины интенсивности флуоресценции (модель С1), и $86,9 \pm 7,1\%$ – для модели, использующей параметры JIP-теста (модель J1). В таблице 2 приведена точность выявления токсического действия в зависимости от вида токсиканта, его концентрации и продолжительности инкубации. Видно, что действие CdSO_4 эффективно выявляется уже после 2 ч инкубации, в то время как достоверное выявление токсического действия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ возможно только после инкубации продолжительностью 9 и более часов. Количество ложноположительных результатов для контрольных образцов возрастает с увеличением времени инкубации в колбах, что, вероятнее всего, связано с развитием у части образцов стресса, связанного с переносом из природной среды в лабораторные условия.

Исходя из полученных результатов, мы исключили из обучающего набора данных образцы, инкубированные с добавлением $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в течение 2–8 ч. Средняя точность выявления наличия либо отсутствия токсического действия ТМ для моделей, обученных с использованием этого набора, возросла и составила $89,5 \pm 4,3\%$ для модели, использующей величины интенсивности флуоресценции (модель С2), и $89,5 \pm 5,4\%$ – для модели, использующей параметры JIP-теста (модель J2). Это увеличение точности связано с уменьшением количества ошибок первого рода (ошибочного выявления токсического действия для контрольных образцов), и оно сопровождается снижением чувствительности моделей при выявлении действия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ на начальных стадиях.

Точность моделей С2 и J2 одинакова, однако распределение ошибок для них несколько различается. Доля ошибок второго рода (то есть ошибочного невыявления токсического действия) для моделей типа «С» несколько меньше, чем для моделей типа «J». Это может быть связано с тем, что при расчёте параметров JIP-теста происходит частичная потеря информации о форме индукционной кривой, в результате чего специфичность модели к выявлению токсического стресса на фоне проявлений действия стрессовых факторов иной природы может снижаться. Однако число обучаемых параметров в модели типа «J» значительно меньше по сравнению с типом «С» (225 против 3665), поэтому для обучения модели типа «J» требуется значительно меньшая обучающая выборка.

Заключение

Разработан прототип нейросетевой модели, предназначенной для выявления токсического стресса в клетках фитопланктона по параметрам индукционной кривой флуоресценции хлорофилла. Для обучения модели использованы экспериментальные данные по действию солей кадмия и хрома на природный фитопланктон из 9 водоёмов Псковской области. Созданная модель позволяет выявить токсическое действие ТМ с точностью около 90%, что показывает перспективность её использования в системе экологического мониторинга. По мере накопления экспериментальных данных по действию различных неблагоприятных факторов на природный фитопланктон предполагается дальнейшее совершенствование данного метода и создание на его базе автоматизированной автономной системы для раннего обнаружения токсического загрязнения природных вод.

Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ № 121032500060-0 при частичной поддержке гранта РФФ № 20-64-46018 (Псковский государственный университет).

References

1. Van Assche F., Clijsters H. Multiple effects of heavy metal toxicity on photosynthesis // Effects of stress on photosynthesis / Eds. R. Marcelle, H. Clijsters, M. van Poucke. The Hague: Nijhoff/Junk. 1983. P. 371–382. doi: 10.1007/978-94-009-6813-4_39
2. Giloni-Lima P.C., Delello D., Cremonez M.L., Éler M.N., Lima V.A., Espindola E.L. A study of the effects of chromium exposure on the growth of *Pseudokirchneriella subcapitata* (Korshikov) hindak evaluated by central composite design and response surface methodology // Ecotoxicology. 2010. V. 19. P. 1095–1101. doi: 10.1007/s10646-010-0491-2
3. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // Environmental Chemistry Letters. 2010. V. 8. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8
4. Sall M.L., Diaw A.K.D., Gningue-Sall D., Aaron S.E., Aaron J-J. Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review // Environmental Science and Pollution Research. 2020. V. 27. P. 29927–29942. doi: 10.1007/s11356-020-09354-3
5. Appenroth K.J., Stöckel J., Srivastava A., Strasser R.J. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrhiza* as probed by OJIP chlorophyll

- a* fluorescence measurements // Environmental Pollution. 2001. V. 115. P. 49–64. doi: 10.1016/s0269-7491(01)00091-4
6. Wang S., Zhang D., Pan X. Effects of cadmium on the activities of photosystems of *Chlorella pyrenoidosa* and the protective role of cyclic electron flow // Chemosphere. 2013. V. 93. No. 2. P. 230–237. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.04.070
7. Todorenko D., Timofeev N., Kovalenko I., Kukarskikh G., Matorin D., Antal T. Chromium effects on photosynthetic electron transport in pea (*Pisum sativum* L.) // Planta. 2020. V. 251. No. 11. doi: 10.1007/s00425-019-03304-1
8. Kalaji H.M., Goltsev V.N., Žuk-Gołaszewska K., Živčák M., Brestic M. Chlorophyll fluorescence: understanding crop performance-basics and applications. Boca Raton: CRC Press, 2017. 236 p. doi: 10.1201/9781315153605
9. Kalaji H.M., Rastogi A., Živčák M., Brestic M., Daszkowska-Golec A., Sitko K., Alsharafa K.Y., Lotfi R., Stypiński P., Samborska I.A., Cetner M.D. Prompt chlorophyll fluorescence as a tool for crop phenotyping: an example of barley landraces exposed to various abiotic stress factors // Photosynthetica. 2018. V. 56. P. 953–961. doi: 10.1007/s11099-018-0766-z
10. Matorin D.N., Rubín A.B. Chlorophyll fluorescence of higher plants and algae. Moskva–Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2012. 256 p. (in Russian).
11. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll *a* fluorescence transient // Chlorophyll *a* fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration Series / Eds. G.C. Papageorgiou, Govindjee. Rotterdam: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 321–362.
12. Stirbet A., Govindjee. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll *a* fluorescence induction) and photosystem II: basics and applications of the OJIP fluorescence transient // Journal of Photochemistry and Photobiology. 2011. V. 104. P. 236–257. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2010.12.010
13. Riznichenko G.Yu., Belyaeva N.E., Dyakonova A.N., Kovalenko I.B., Maslakov A.S., Antal T.K., Goryachev S.N., Plyusnina T.Yu., Fedorov V.A., Khrushchev S.S., Rubín A.B. Photosynthetic electron transport models // Biofizika. 2020. V. 65. No. 5. P. 886–902 (in Russian). doi: 10.31857/S0006302920050063
14. Goltsev V., Zaharieva I., Chernev P., Kouzmanova M., Kalaji H.M., Yordanov I., Krasteva V., Alexandrov V., Stefanov D., Allakhverdiev S.I., Strasser R.J. Drought-induced modifications of photosynthetic electron transport in intact leaves: analysis and use of neural networks as a tool for a rapid non-invasive estimation // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics. 2012. V. 1817. No. 8. P. 1490–1498. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.04.018
15. Kalaji M.H., Bąba W., Gediga K., Goltsev V., Samborska I.A., Cetner M., Dimitrova S., Piszcz U., Bielecki K., Karmowska K., Dankov K., Kompała-Bąba A. Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants // Photosynthesis Research. 2018. V. 136. No. 3. P. 329–343. doi: 10.1007/s11120-017-0467-7
16. Aleksandrov V. Identification of nutrient deficiency in bean plants by prompt chlorophyll fluorescence measurements and Artificial Neural Networks // BioRxiv preprint. 2019. doi: 10.1101/664235
17. Drozdenko T.V. Phytoplankton as an indicator of the ecological state of a reservoir (for example, Lake Barskoye, Pskov region) // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2018. V. 18. No. 2. P. 225–231 (in Russian). doi: 10.18500/1816-9775-2018-18-2-225-231
18. Smirnov N.P. Theoretical questions of the lakes classification. Sankt-Peterburg: Nauka, 1993. 185 p. (in Russian).
19. Sládeček V. System of water quality. Stuttgart: Archiv für Hydrobiologie–Beiheft: Ergebnisse der Limnologie 7, 1973. 218 p. doi: 10.1002/aeh.19750030112
20. Perreault F., Dionne J., Didur O., Juneau P., Popovic R. Effect of cadmium on photosystem II activity in *Chlamydomonas reinhardtii*: alteration of O-J-I-P fluorescence transients indicating the change of apparent activation energies within photosystem II // Photosynthesis Research. 2010. V. 107. No. 2. P. 151–157. doi: 10.1007/s11120-010-9609-x

Детоксицирующая способность гуминовых веществ торфов и микроорганизмов рода *Rhodococcus* по отношению к нефтепродуктам в водных средах

© 2021. М. М. Герцен, аспирант, Е. Д. Дмитриева, к. х. н., доцент, Тульский государственный университет, 300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, д. 92, e-mail: mani.leontyeva@gmail.com

Методом биотестирования изучено влияние гуминовых веществ отдельно и совместно с бактериями-нефтедеструкторами рода *Rhodococcus* на тест-объект – ряску малую по отношению к нефтепродуктам. Максимальный прирост лопастей ряски в присутствии гуминовых веществ черноольхового низинного торфа 42%, минимальный – гуминовых веществ сфагнового переходного торфа 24%. Доказано, что гуминовые вещества торфов способны снижать токсический эффект модельных загрязнителей: гексадекана на 3–23%; дизельного топлива – 8–40%; нефти – 6–16%. Определена детоксицирующая способность гуминовых веществ и микроорганизмов рода *Rhodococcus* по отношению к углеводородам нефти: максимальные значения коэффициентов детоксикации у микроорганизмов *R. erythropolis* S67 и гуминовых веществ тростникового низинного и сфагнового верхового торфа 95–79% и 84–68%; *R. erythropolis* X5 и гуминовых веществ сфагнового верхового и сфагнового переходного торфа 82–68% и 71–63%. Гуминовые вещества способны стимулировать рост микроорганизмов-нефтедеструкторов, активизируя их ферментативную систему, тем самым, способствуя максимальному окислению углеводородов нефти. Благодаря своим поверхностно- и биологически активным свойствам, совместное применение гуминовых веществ и микроорганизмов-нефтедеструкторов способно обеспечить экологически безопасную и эффективную ремедиацию загрязнённых акваторий.

Ключевые слова: гуминовые вещества, нефть, нефтепродукты, микроорганизмы-нефтедеструкторы, связывающая способность, коэффициенты детоксикации.

Binding capacity of humic substances of peats in the relation to petroleum products in the presence of microorganisms of the genus *Rhodococcus* in aqueous media

© 2021. М. М. Gertsen ORCID: 0000-0002-0026-4933*
E. D. Dmitrieva ORCID: 0000-0001-6408-5873*
Tula State University,
92, Lenina Ave., Tula, Russia, 300012,
e-mail: mani.leontyeva@gmail.com

The biotesting method was used to study the effect of humic substances separately and together with oil degrading microorganisms of the genus *Rhodococcus* on a test object – duckweed in the relation to oil products. The maximum growth of duckweed blades in the presence of humic substances of black alder fen peat is 42%, the minimum – humic substances of sphagnum transition peat – 24%. It was found that humic substances of peats can reduce the toxic effect of model pollutants: hexadecane by 3–23%; diesel fuel by 8–40%; oil by 6–16%. The detoxifying ability of humic substances and microorganisms of the genus *Rhodococcus* in the relation to oil hydrocarbons was determined: the maximum values of the detoxification coefficients of microorganisms *R. erythropolis* S67 and humic substances of reed fen and sphagnum high-moor peat are 95–79% and 84–68%, respectively; *R. erythropolis* X5 and humic substances of sphagnum high-moor and sphagnum transition peat 82–68% and 71–63%. Humic substances are able to stimulate the growth of oil degrading microorganisms, activating their enzymatic system, thereby contributing to the maximum oxidation of oil hydrocarbons. The data on the detoxifying ability of humic substances and oil degrading microorganisms can serve as the basis for the development of a new generation of biocompositions that efficiently utilize oil and oil products in environmental objects (water and soil). Due to its surface and biologically active properties, the combined use of humic substances and oil degrading microorganisms can provide environmentally friendly and effective remediation of contaminated water areas.

Keywords: humic substances, petroleum, petroleum products, oil-destructive microorganisms, binding capacity, detoxification coefficients.

В настоящее время большой интерес представляет поиск способов детоксикации и утилизации углеводов нефти [1, 2]. Актуальной становится биodeградация нефтяных веществ в загрязнённых акваториях, основанная на применении бактерий, использующих как источник энергии углеводороды нефти, что обеспечивает высокий уровень детоксикации экосистем в связи со снижением уровня загрязнений до фоновых значений [3]. Добавление в систему дополнительных агентов, сорбирующих нефтепродукты, являющихся активаторами аборигенной микрофлоры загрязнённых объектов, позволит усилить эффективность биопрепаратов, содержащих штаммы активных бактерий, разлагающих углеводороды [4].

Гуминовые вещества (ГВ) – природные, экологически чистые соединения, эффективно эмульгирующие углеводороды нефти, активизирующие микробиологические процессы, повышающие деструкцию нефтепродуктов и ускоряющие очистку акваторий [5]. Известно стимулирующее действие ГВ на рост и развитие бактерий, повышение их стрессоустойчивости к различным абиотическим факторам среды [6, 7]. Физиологическая активность гуминовых веществ по отношению к некоторым прокариотическим организмам [8], вызывает естественное стимулирование аборигенной микрофлоры экосистемы, а наличие гидрофобного каркаса в их структуре определяет способность связывать углеводороды нефти в устойчивые комплексы [9].

Цель работы – оценить детоксицирующую способность гуминовых веществ и бактерий рода *Rhodococcus* по отношению к нефтепродуктам.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – гуминовые вещества торфов Тульской области: тростникового низинного (ТНТ), чёрноольхового низинного (ЧНТ), сфагнового верхового (СВТ) и сфагнового переходного (СПТ) [10–12]; штаммы бактерий *Rhodococcus erythropolis* S67, *Rhodococcus erythropolis* X5 получены из лаборатории плазмид Института биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г.К. Скрябина РАН (г. Пущино) [13]. Тест-объект в методе биотестирования – ряска малая (*Lemna minor*). Модельные токсиканты: гексадекан, дизельное топливо (ДТ) с заправки «Роснефть» и нефть с нефтеперерабатывающего завода АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-МНПЗ».

Растворы ГВ в концентрации 50 мг/л готовили растворением ГВ в 0,1М NaOH, добавлением 0,05М HNO₃ или 0,05М NaOH добивались нейтрального значения pH (контроль pH-метром «Анион 4154»), фоновый электролит – 0,1М NaNO₃ [14]. Бактерии культивировали в полноценной среде Лурия–Бертани (ЛБ) при температуре 23±2 °С [14, 15].

В стеклянные ёмкости вносили 50 мл дистиллированной воды, ГВ концентрации 50 мг/л, инокулят *R. erythropolis* S67 и X5 количество посевной дозы 10⁵–10⁶ КОЕ/мл и токсикант 2% об. О действии модельных загрязнителей и ГВ наблюдали по приросту лопастей ряски малой за 10 суток. Контроль – рост растений в дистиллированной воде. Результаты экспериментов выражали как прирост лопастей ряски в процентах относительно контроля [11]. Варианты опыта: 1. Контроль (дистиллированная вода); 2. Контроль + модельный загрязнитель; 3. Дистиллированная вода + ГВ; 4. Дистиллированная вода + ГВ + модельный загрязнитель; 5. Дистиллированная вода + ГВ + бактерии рода *Rhodococcus* + модельный загрязнитель. Результаты экспериментов и последующая обработка проводилась с применением стандартных методов математической статистики ($n = 6, P = 0,95$).

Результаты и обсуждение

Прежде всего, определяли влияние ГВ на рост ряски малой (рис. 1).

Установлено, что анализируемые ГВ (50 мг/л) стимулируют рост гидрофита: максимальный прирост лопастей ряски в присутствии ГВ (ЧНТ) 42%, минимальный – ГВ (СПТ) 24%. Черноольховый низинный торф состоит в основном из листовенных пород, влияющих на содержание лигнина во фракциях ГК [10]. Известно, что применение лигниновых агентов меняет динамику распределения основных метаболитов в растениях, продолжительность их развития, биометрические и биохимические показатели [15].

Для выбора рабочей дозы модельного загрязнителя строили шкалу токсичности, варьируя концентрацию модельного загрязнителя в пределах 0,5–5% об [12, 15]. Тест-отклик регистрировали через 14 дней после начала эксперимента. Токсический эффект загрязнителей ($T_{ст}$) – уменьшение тест-отклика в присутствии токсиканта ($R_{ст}$) по сравнению с контролем (R_0):

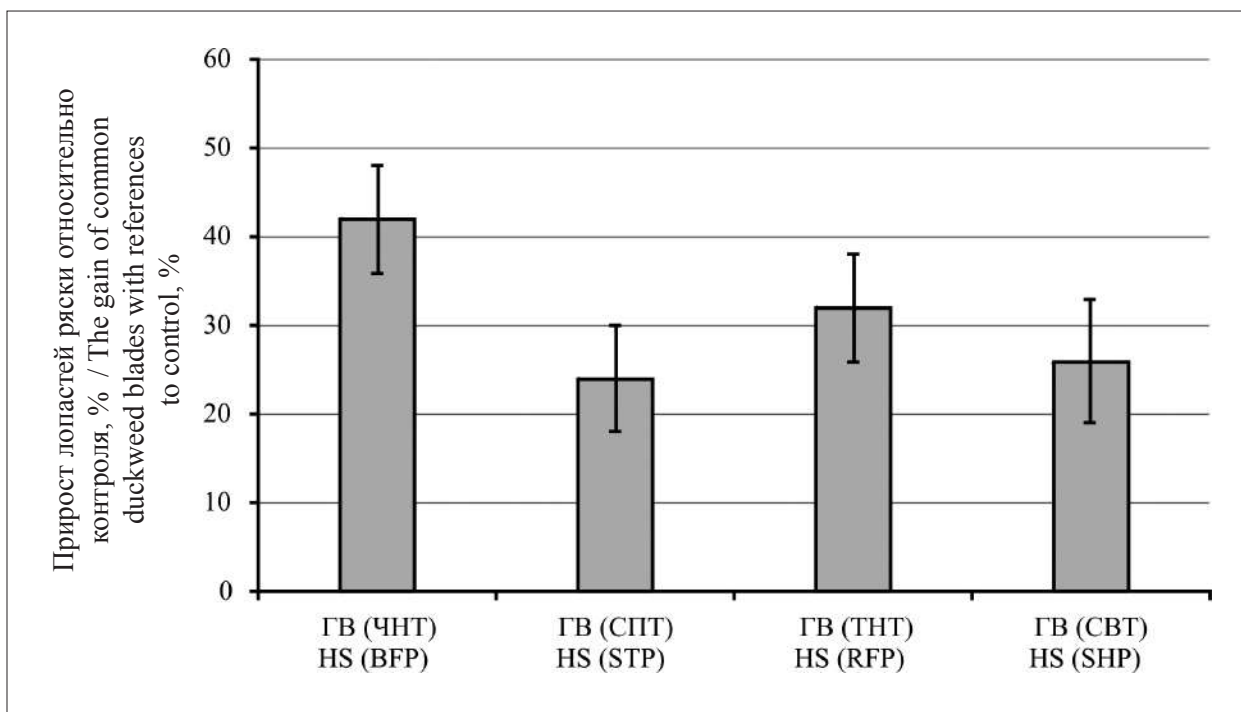


Рис. 1. Влияние гуминовых веществ на прирост лопастей ряски малой:

ГВ – гуминовые вещества; ЧНТ – чёрноольховый низинный торф;
 СПТ – сфагновый переходный торф; ТНТ – тростниковый низинный торф;
 СВТ – сфагновый верховой торф

Fig. 1. Influence of humic substances on the growth of blades of common duckweed:
 HS – humic substances; BFP – black alder fen peat; STP – sphagnum transitional peat;
 RFP – reed fen peat; SHP – sphagnum high moor peat

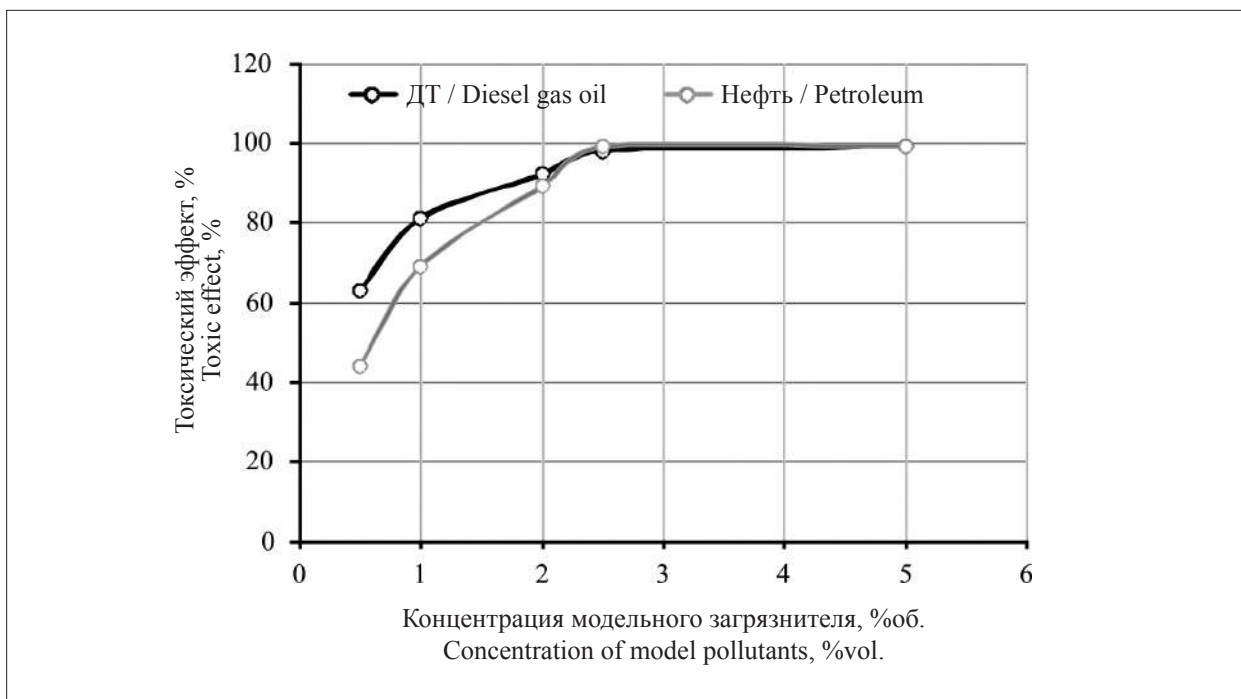


Рис. 2. Токсический эффект модельных загрязнителей

Fig. 2. Toxic effect of model pollutants

$$T_{\text{эт}} = \frac{R_0 - R_{\text{эт}}}{R_0} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Токсический эффект рассчитывали по формуле (1) и строили зависимость токсического эффекта от концентрации загрязнителя (рис. 2).

Степень токсичности углеводородов нефти связана с содержанием в них ароматических фракций, способных сохраняться в морской воде, в донных отложениях в течение долгого времени в силу своей стойкости к деградации. Парафины обладают не меньшей токсичностью, но их разложение происходит значительно быстрее, чем у полиароматических углеводородов [16].

Рассчитывали токсический эффект модельного загрязнителя в присутствии ГВ ($T_{\text{ГВ+эт}}$), контролем служил тест-отклик в присутствии ГВ ($R_{\text{ГВ}}$) (табл. 1):

$$T_{\text{ГВ+эт}} = \frac{R_{\text{ГВ}} - R_{\text{ГВ+эт}}}{R_{\text{ГВ}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Максимальное снижение токсического эффекта загрязнителей у ГВ (СВТ): в 1,5–2 раза меньше, чем в контрольных образцах с отстойной водой, содержащих гексадекан и дизельное топливо; минимальное – у ГВ (ЧНТ), что на 3% меньше относительно контроля. В варианте с нефтью максимальное снижение токсической нагрузки оказывают ГВ (ТНТ), что на 16% меньше, чем в контроле, благодаря развитой периферической и ароматической части данных ГВ происходит связывание углеводородов нефти в нетоксичные аддукты.

Изучено действие загрязнителей на рост ряски малой в присутствии ГВ и микроорганизмов-нефтедеструкторов рода *Rhodococcus* и количественно проанализирована детоксицирующая способность полученной биокомпозиции, с определением коэффициента детоксикации [15], при этом сравнивали тест-отклик контроля и контроля

в присутствии бактерий рода *Rhodococcus* совместно с модельным загрязнителем, так как оценивали действие только ГВ на исследуемый тест-объект:

$$T_{\text{м/о+эт}} = \frac{R_0 - R_{\text{м/о+эт}}}{R_0} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Количественно детоксицирующее действие (D) ГВ оценивали, как относительное уменьшение токсического эффекта модельного токсиканта в присутствии ГВ по сравнению с исходным токсическим эффектом загрязнителя:

$$D = \frac{T_{\text{эт}} - T_{\text{ГВ+эт}}}{T_{\text{эт}}} \quad (4)$$

$$D = \frac{T_{\text{м/о+эт}} - T_{\text{ГВ+эт}}}{T_{\text{м/о+эт}}} \quad (5)$$

Суммируя выше представленные уравнения, коэффициент детоксикации (D) определяли через величины соответствующих тест-откликов по уравнениям:

$$D = \frac{1 - \frac{R_{\text{ГВ}} - R_{\text{ГВ+эт}}}{R_{\text{ГВ}}}}{\frac{R_0 - R_{\text{эт}}}{R_0}} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$D = \frac{1 - \frac{R_{\text{ГВ}} - R_{\text{ГВ+эт}}}{R_{\text{ГВ}}}}{\frac{R_0 - R_{\text{м/о+эт}}}{R_0}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Данный расчёт позволяет оценить степень детоксицирующего эффекта, вызываемого уменьшением концентрации модельного токсиканта, на фоне собственного воздействия ГВ на тест-объект. Значение коэффициента детоксикации зависит только от связывающей способности ГВ по отношению к модельному загрязнителю.

Таблица 1 / Table 1
Токсический эффект загрязнителей в присутствии гуминовых веществ
Toxic effect of pollutants in the presence of humic substances

Образец Sample	Гексадекан Hexadecane	Дизельное топливо Diesel gas oil	Нефть Petroleum
Контроль / Control	74±1	92±3	89±5
ГВ (ЧНТ) / HS (BFP)	72±3	84±4	83±7
ГВ (СПТ) / HS (STP)	73±3	66±5	78±6
ГВ (ТНТ) / HS (RFP)	67±2	61±3	73±3
ГВ (СВТ) / HS (SHP)	52±3	52±4	76±2

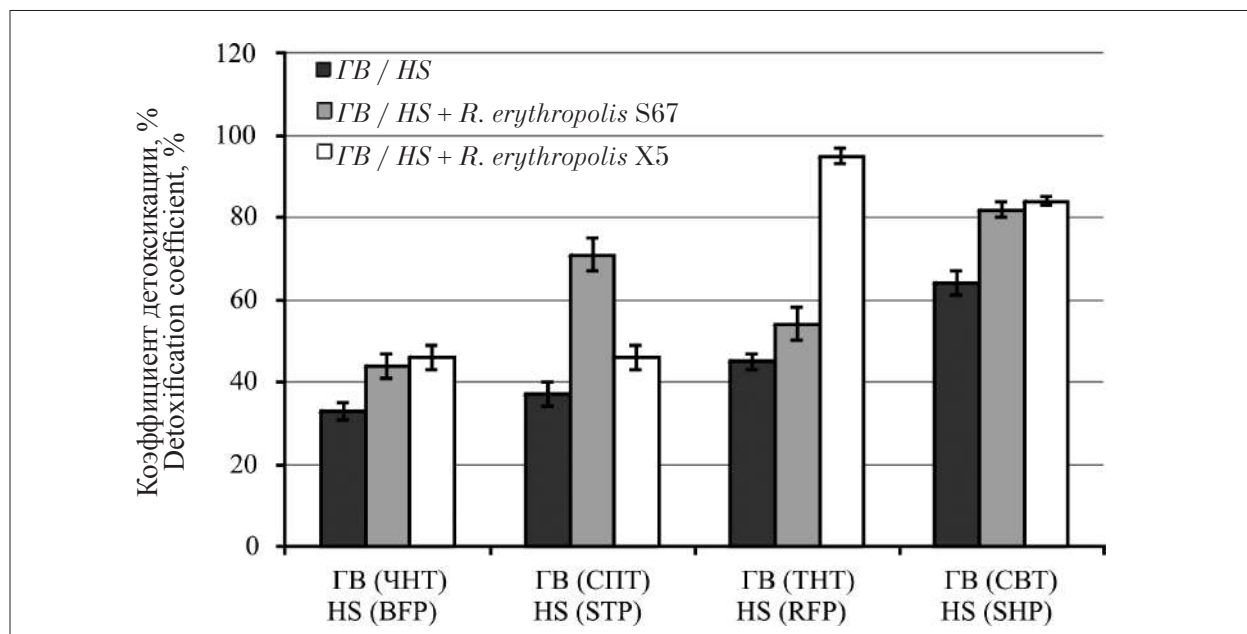


Рис. 3. Детоксицирующий эффект ГВ по отношению к гексадекану
Fig. 3. Detoxification effect of HS on hexadecane

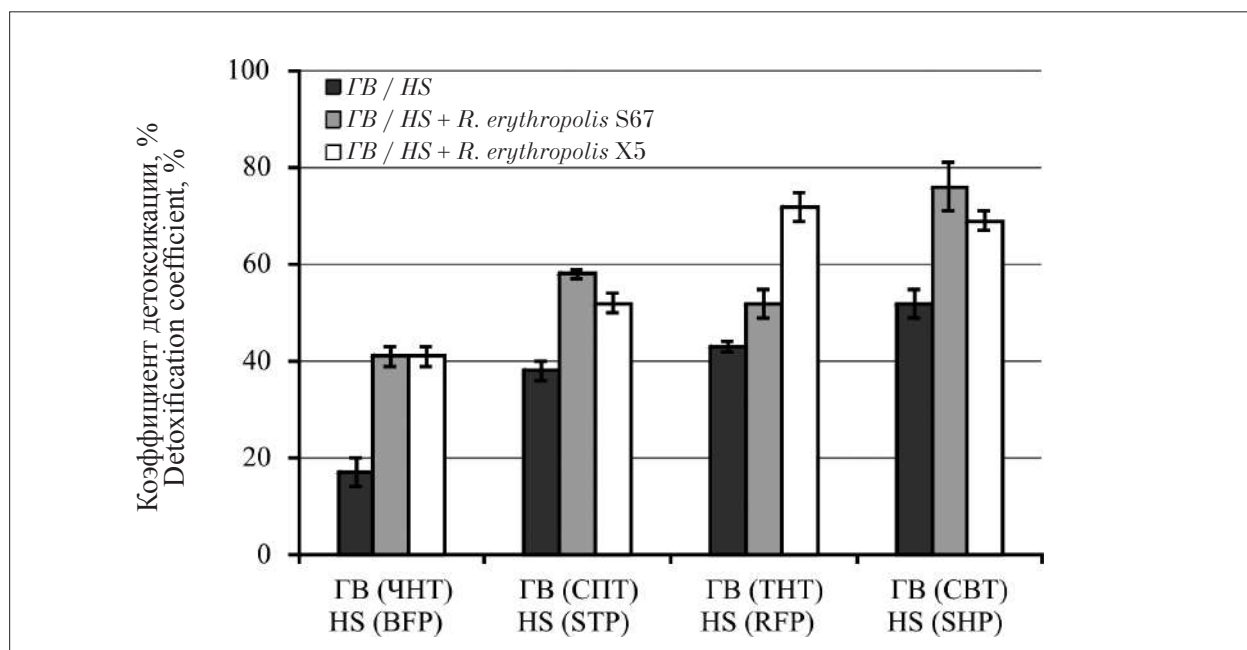


Рис. 4. Детоксицирующий эффект ГВ по отношению к ДТ
Fig. 4. Detoxification effect of HS on diesel gas oil

Выявлено снижение токсического эффекта гексадекана ГВ на рыску малую. Максимальный детоксицирующий эффект проявляли ГВ (СВТ) и ГВ (ТНТ) 64–56 и 45–51% соответственно (рис. 3). Бактерии *R. erythropolis* S67, X5 увеличивали детоксицирующий эффект ГВ на 6–47%. Значения *D* в присутствии микроорганизмов *R. erythropolis* S67, ГВ (ТНТ), ГВ (СВТ) 95–79% и 84–68%;

R. erythropolis X5 и ГВ (СВТ), (СПТ) 82–68% и 71–63% соответственно, что согласуется с ранее полученными результатами [17].

Максимальный детоксицирующий эффект по отношению к дизельному топливу продемонстрировали ГВ (СВТ) и ГВ (ТНТ) 52 и 43% соответственно (рис. 4). Углеводородоокисляющие микроорганизмы *R. erythropolis* S67 и X5 увеличивают детоксицирующий

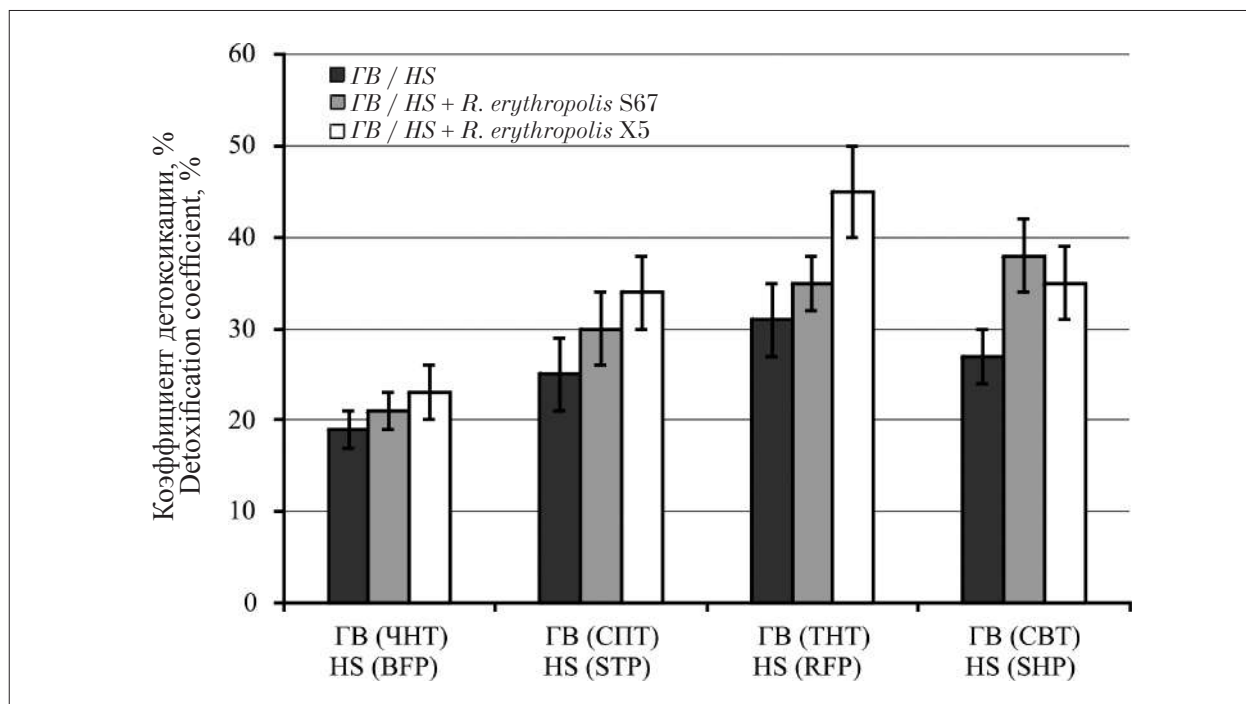


Рис. 5. Детоксирующий эффект ГВ по отношению к нефти
Fig. 5. Detoxification effect of HS on petroleum

эффект ГВ. Наилучшие показатели у биокомпозиции на основе микроорганизмов *R. erythropolis* S67 и ГВ (ТНТ), ГВ (СВТ) 72 и 69% соответственно. Максимальный показатель детоксикации дизельного топлива продемонстрировали микроорганизмы *R. erythropolis* X5 и ГВ (СВТ) 76% (рис. 4).

Наличие в составе ГВ как полярных, так и неполярных компонентов вносит вклад в снижение уровня токсичности нефти и нефтепродуктов, обусловленное и непосредственным связыванием ГВ нефтяных углеводородов, и стимулирующим действием ГВ на тест-объект, которое проявляется в повышении сопротивляемости ряски малой нефтяному загрязнению. Максимальный коэффициент детоксикации у ГВ (ТНТ) и ГВ (СВТ) 31 и 27% соответственно. Добавление микроорганизмов рода *Rhodococcus* увеличивало значения коэффициентов детоксикации: максимальные значения у штаммов *R. erythropolis* S67 и ГВ (ТНТ), ГВ (СВТ) 45 и 35%; *R. erythropolis* X5 и ГВ (СВТ), ГВ (ТНТ) 38 и 35% соответственно (рис. 5).

Полученные значения коэффициентов детоксикации могут свидетельствовать о перспективности применения ГВ и микроорганизмов-нефтедеструкторов *R. erythropolis* S67 и X5 в качестве экологически безопасных и эффективных ремедиантов загрязнённых нефтью акваторий.

Заключение

Методом биотестирования определена детоксирующая способность ГВ совместно с бактериями рода *Rhodococcus* по отношению к углеводородам нефти: максимальные значения коэффициентов детоксикации у микроорганизмов *R. erythropolis* S67 и ГВ (ТНТ) и ГВ (СВТ) 95–79% и 84–68%; *R. erythropolis* X5 и ГВ (СВТ) и (СПТ) 82–68% и 71–63%.

Установлено, что ГВ торфов способны снижать токсический эффект модельных загрязнителей на тест-объект – ряску малую: гексадекана на 3–23%; дизельного топлива – 8–40%; нефти – 6–16%.

Полученные данные по детоксирующей способности ГВ и микроорганизмов-нефтедеструкторов могут служить основой для разработки биокомпозиции нового поколения, эффективно утилизирующей нефть и нефтепродукты в объектах окружающей среды (вода и почва).

References

1. Gritsenko A.I., Akopova G.S., Maksimov V.M. Ecology. Oil and gas. Moskva: Nauka, 1997. 598 p. (in Russian).
2. Hernandez-Soriano M.C. Environmental risk assessment of soil contamination. London: IntechOpen, 2014. 920 p. doi: 10.5772/57086

3. Peng F., Liu Z., Wang L., Shao Z. An oil-degrading bacterium: *Rhodococcus erythropolis* strain 3C-9 and its biosurfactants // *Journal of Applied Microbiology*. 2007. V. 102. No. 6. P. 1603–1611. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.03267.x
4. Semenova A.A., Zaynulgabidinov E.R., Madyakina M.V., Yuranets-Luzhaeva R.Ch., Shulaev M.V., Petrov A.M. The impact of the application of biologically active drugs on the toxicological characteristics and destructive activity of oil-contaminated soil in the course of reclamation work // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. No. 18 (12). P. 178–182 (in Russian).
5. Chukov S.N. Formation and role of humic substances in biosphere // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 8–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-008-012
6. Koronelli T.V. Principles and methods for intensifying the biological destruction of hydrocarbons in the environment // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 1996. No. 32 (6). P. 579–585 (in Russian).
7. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zaynulgabidinov E.R., Madyakina M.V., Shulaev M.V. The study of the toxicological characteristics of oil-contaminated soil in the process of remediation using biologically active substances // *Vestnik KazNTU*. 2017. V. 20. No. 14. P. 143–145 (in Russian).
8. Boykova O.I., Volkova E.M. Chemical and biological properties of peat in Tula region // *Izvestiya TulGU. Estestvennyye nauki*. 2013. No. 3. P. 253–264 (in Russian).
9. Dmitrieva E.D., Leonteva M.M., Syundyukova K.V. Molecular mass distribution of humic substances and himatomelanin acids of peats of different genesis in the Tula region // *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2017. No. 4. P. 187–194 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2017041933
10. Dmitrieva E.D., Efimova E.N., Siundiukova K.V., Perelomov L.V. Surface properties of humic acids from peat and sapropel of increasing transformation // *Environmental chemistry letters*. 2015. V. 13. No. 2. P. 197–202. doi: 10.1007/s10311-015-0497-3
11. Perminova I.V., Hatfield K., Hertkorn N. Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice. Dordrecht, Springer, 2005. 506 p. doi: 10.1007/1-4020-3252-8
12. Shirshin E.A., Budylin G.S., Grechischeva N.Yu., Fadeeva V.V., Perminova I.V. Experimental evidence of incomplete fluorescence quenching of pyrene bound to humic substances: implications for KOC measurements // *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2016. No. 15. P. 889–895. doi: 10.1039/C6PP00052E
13. Dagurov A.V., Khokhlova E.M., Stom D.I. Effect of humates on oil products // *V mire nauchnykh otkrytiy*. 2010. No. 4–14 (10). P. 159–160 (in Russian).
14. Evans C.G.T., Herbert D., Tempest D.B. The continuous cultivation of microorganisms // *Methods in Microbiology*. 1970. No. 2. P. 277–327. doi: 10.1016/S0580-9517(08)70227-7
15. Salem K.M., Grechishcheva N.Yu., Perminova I.V., Meshcheryakov S.V., Bludova L.N. The study of the detoxifying ability of humic preparations in the relation to oil pollution of soil // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2004. No. 1. P. 34–37 (in Russian).
16. Dzhamalov R.G. Engineering geoecology: basics of hydrogeology, engineering geology, geocryology: a textbook. Dubna: Gos. un-t “Dubna”, 2017. 350 p. (in Russian).
17. Dmitrieva E.D., Karimova V.T. Binding capacity of humic substances of peat from Tula region in the presence of microorganisms of oil destructors of the genus *Rhodococcus* to hexadecane // *Vestnik TvGU. Seriya: Khimiya*. 2018. No. 2. P. 145–157 (in Russian).

Стимуляция аборигенной аэробной микрофлоры для биоремедиации грунтов, загрязнённых нефтепродуктами

© 2021. И. В. Трусей^{1,2}, к. б. н., зав. лабораторией,
Ю. Л. Гуревич², д. ф.-м. н., г. н. с., В. П. Ладыгина², к. ф.-м. н., н. с.,
С. В. Фадеев³, гл. гидрогеолог,

¹Красноярский государственный педагогический
университет им. В. П. Астафьева,

660049, Россия, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, д. 89,

²Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской Академии наук»,

660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50,

³ООО Минусинская гидрогеологическая партия,
662624, Россия, Красноярский край, Минусинский район,

с. Селиваниха, ул. Заречная, д. 3г,

e-mail: btchem@mail.ru

Анализировали численность психрофильных и мезофильных аэробных микроорганизмов (МО) в загрязнённых нефтепродуктами грунтах зоны аэрации и грунтовых водах при проведении восстановительных работ (биоремедиации). В результате обработки минеральными удобрениями в грунтах зоны аэрации численность МО увеличивалась на 1–2 порядка. Численность аммонифицирующих МО возросла до 10^7 КОЕ/г, углеводородокисляющих – до 10^6 КОЕ/г. В грунтовых водах численность психрофильных углеводородокисляющих МО увеличивалась с 10^4 до 10^7 КОЕ/мл, мезофильных – с 10^5 до 10^7 КОЕ/мл; аммонифицирующих – с 10^4 до 10^8 КОЕ/мл и 10^5 до 10^7 КОЕ/мл соответственно. Также при обработке увеличивались численность и разнообразие простейших. В грунтах зоны аэрации обнаруживались только жгутиконосцы р. *Bodo*, численность которых изменялась с 10–100 до 1000 особей/г; в грунтовых водах – с 10^2 – 10^3 до 10^4 особей/мл. В грунтовых водах в отдельных пробах встречались ресничные инфузории (Ciliata, р. *Uronema*), численность которых составляла 10 особей/мл. После обработки ресничные обнаруживались во всех образцах воды, численность возросла до 10^2 – 10^3 особей/мл, наряду с р. *Uronema* обнаруживались инфузории р. *Colpoda*. При биоремедиации изменялся химический состав (содержание аммонийного и нитратного азота и др.) и перманганатная окисляемость грунтовой воды, что свидетельствовало о разложении нефтепродуктов. В течение трёх лет концентрация нефтепродуктов в грунтовых водах снизилась с 120–500 до 1,5–10,0 мг/дм³.

Ключевые слова: биоремедиация, психрофильные микроорганизмы, зона аэрации, грунтовые воды, нефтепродукты, простейшие.

Stimulation of indigenous aerobic microflora for bioremediation of soils polluted with petroleum products

© 2021. I. V. Trusei^{1,2} ORCID: 0000-0003-4831-9101¹

Yu. L. Gurevich² ORCID: 0000-0003-0250-845X²

V. P. Ladygina² ORCID: 0000-0001-8520-080X²

S. V. Fadeev³ ORCID: 0000-0002-4238-9734³

¹Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev,
89, Ady Lebedevoy St., Krasnoyarsk, Russia, 660049,

²Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Centre of the Siberian Branch
of Russian Academy of Science”,

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036,

³JSC Minusinskaya Hydrogeological Part,

3g, Zarechnaya St., Selivaniha,

Minusinsk District, Krasnoyarsk Territory, Russia, 662624,

e-mail: btchem@mail.ru

The numbers of hydrocarbon-oxidizing and ammonifying microorganisms (psychrophilic and mesophilic) in the soils of the aeration zone and groundwater polluted with petroleum products under application of mineral fertilizers were analyzed. In the soils of the aeration zone, the numbers of aerobic microorganisms increased by 1–2 orders of magnitude, ammonifying ones – up to 10^7 CFU/g, hydrocarbon oxidizing microorganisms – up to 10^6 CFU/g. In groundwater the numbers of psychrophilic hydrocarbon-oxidizing microorganisms increased from 10^4 to 10^7 CFU/mL, mesophilic ones from 10^5 to 10^7 CFU/mL; the numbers of ammonifying microorganisms increased from 10^4 to 10^8 and from 10^5 to 10^7 CFU/mL, respectively. The number and variety of protozoa also increased. In the soils only flagellates of Bodo genus were found, their numbers during processing changed from 10 – 10^2 to 10^3 cells/g; in groundwater from 10^2 – 10^3 to 10^4 cells/mL. The number of ciliata (Ciliata, *Uronema* genus) in groundwater changed from tens of cells per mL to 10^2 – 10^3 cells/mL. After treatment, ciliata were detected in all water samples, and in addition to *Uronema* genus ciliata of *Colpoda* genus were discovered. The biostimulation produced changes in the chemical composition of groundwater (ammonium, nitrate concentration et al.), permanganate oxidizability of water, that indicated the decomposition of petroleum products and the appearance of easily oxidizable organic substances in water. The concentration of petroleum products in groundwater over the course of 3 years has decreased from 120–500 to 1.5–10.0 mg/dm³.

Keywords: bioremediation, cold-adapted microorganisms, aeration zone, groundwater, petroleum products, protozoa.

В районе городов и промышленных объектов часто грунты и грунтовые воды загрязнены нефтью и нефтепродуктами [1–3]. Нередко на поверхности зеркала грунтовых вод наблюдаются линзы нефтепродуктов мощностью до нескольких метров [2, 4]. В связи с этим возникает задача рекультивации таких объектов. Аборигенная микрофлора почв, особенно загрязнённых, способна к деградации углеводородов нефти практически всех фракций [5]. В грунтах, для которых характерно ограниченное поступление кислорода, в деградации углеводородов принимают участие как аэробные, так и анаэробные микроорганизмы [6]. Естественный процесс восстановления загрязнённых нефтепродуктами грунтов продолжительный, например, за 13 лет деструкция сырой нефти в подземной среде составила 46% [7]. При экспоненциальном характере самоочищения, удаление 80 и 90% загрязнения произойдёт за 34 и 49 лет, соответственно. Заметим, что сырая нефть окисляется быстрее, чем её фракции (нефтепродукты). Очевидно, что стимулирование роста аборигенной микрофлоры загрязнённого грунта может существенно ускорить процесс очищения среды. Биоремедиация *in situ* считается малозатратным подходом к рекультивации нефтезагрязнённых объектов [8]. Его реализация существенно зависит от условий подземной среды, функциональных свойств аборигенной микрофлоры и возможности её стимулирования.

Цель настоящей работы – оценка численности психрофильных и мезофильных аэробных микроорганизмов в загрязнённых нефтепродуктами грунтах, а также изменения химических показателей грунтовых вод при проведении биоремедиационных мероприятий.

Объекты и методы исследования

Исследуемые грунты сложены из гравийно-галечных, супесчаных пород, на поверхности которых имеется техногенный слой (0,5 м). Уровень грунтовых вод изменяется в пределах 4–7 м, температура – +4–8 °С. Грунты загрязнены в результате утечки нефтепродуктов из хранилища ТЭЦ. Загрязняющие вещества – смесь мазута, дизельного топлива и технологических масел. Содержание нефтепродуктов в зоне насыщения (2001 г.) составляло 1,35–66,75 г/кг, на поверхности грунтовых вод наблюдалась линза мощностью 0,2–0,5 м. Биоремедиация включала внесение минеральных удобрений в грунты зоны аэрации (на поверхность грунта) и насыщения (в наблюдательные скважины) (табл. 1). Удобрения вносили с учётом расположения наблюдательных скважин относительно зоны загрязнения и направления движения грунтовых вод (рис.). На поверхность грунта вокруг скважины 159 вносили раствор минеральных удобрений, в радиусе 5–6 м. Общая площадь обработанной территории 200 м². Для исследования грунта южнее скважины 159 были пробурены две инженерно-геологические скважины глубиной 5 м, образцы грунтовой воды отбирали из наблюдательных скважин.

Численность аэробных микроорганизмов определяли методом посева в многослойный агар [9], простейших – методом предельных разведений. Аммонифицирующие микроорганизмы (АМ) выделяли на пептонном агаре, углеводородокисляющие (УОМ) – на минерально-солевой среде с нефтью [10]. Психрофильные микроорганизмы культивировали при температуре +5–10 °С, мезофильные – при +30–35 °С. Для выделения про-

Таблица 1 / Table 1

Схема внесения минеральных удобрений в грунты зоны аэрации и насыщения, загрязнённые нефтепродуктами / Scheme of mineral fertilizers application in the subsurface of aeration and saturation zones contaminated with petroleum products

Период Time	Вид обработки Processing type	Удобрения Fertilizers	Номер скважины / Доза, кг Well number / Dose, kg			
			159	237	238	239
Июнь–август 2005 г. June–August 2005	1	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	4,0	–	–	–
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4,0	–	–	–
	2	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	15,5	3,0	0,12	0,12
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	11,0	2,0	–	–
Сентябрь 2005 г. September 2005	2	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	6,0	–	–	–
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4,5	–	–	–
		MgSO_4	0,9	–	–	–
Август–сентябрь 2006 г. August–September 2006	1	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	2,5	–	–	–
		$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	1,0	–	–	–
	2	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	3,75	–	3,75	–
		$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	1,5	–	1,5	–

Примечание: 1 – внесение на поверхность грунта, 2 – внесение в наблюдательные скважины, прочерк – не вносили.
Notes: 1 – application on the soil surface, 2 – application into inspection wells, “–” – not add.

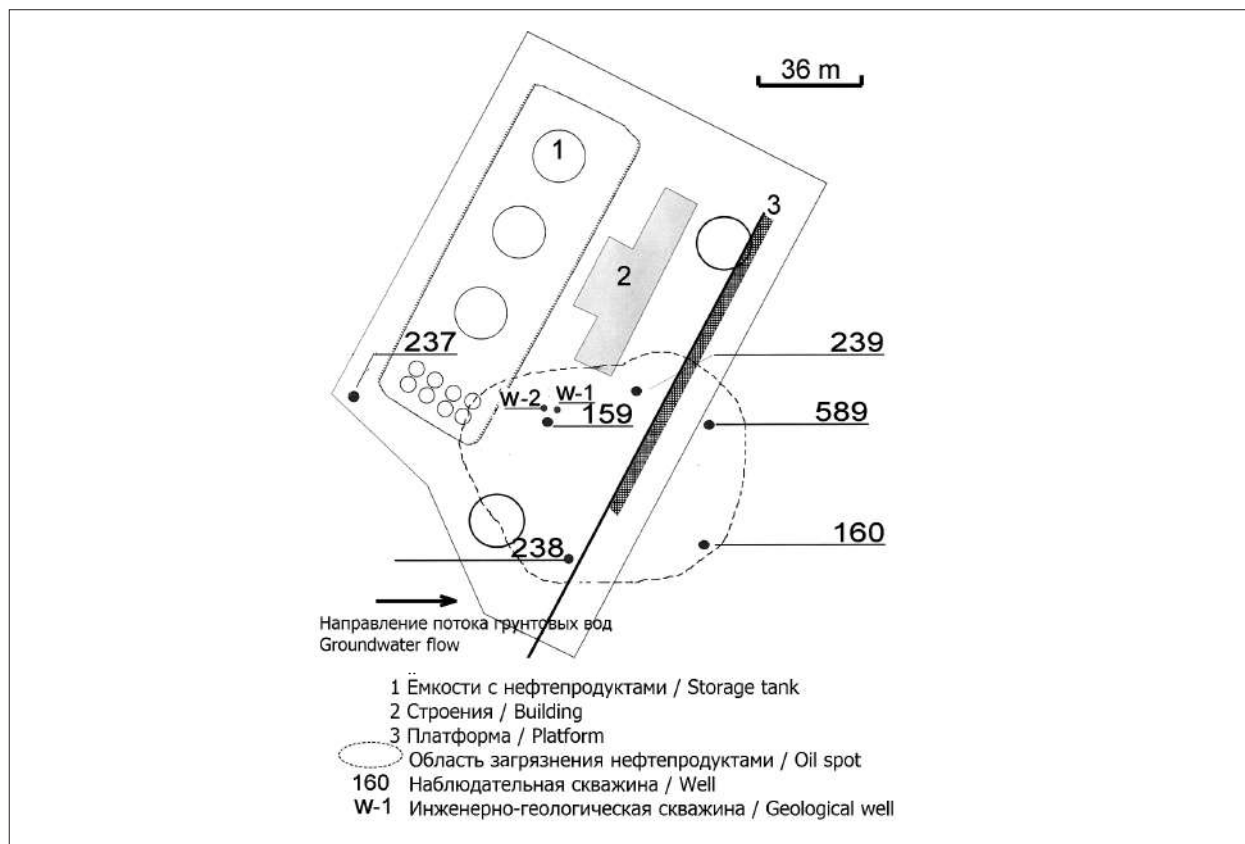


Рис. Расположение наблюдательных скважин на территории ТЭЦ
Fig. Location of observation wells on the territory of the heat and power plant

стейших использовали метод накопительного культивирования, идентификацию проводили по морфологическим признакам с применением светового микроскопа [11, 12]. Математическую обработку численности простейших проводили по таблице Мак-Креди ($P_{0,95}$) [13], бактерий – с использованием статистики Пуассона [9]. Химический анализ грунтовой воды проводили по стандартизированным методикам [4]. Содержание нефтепродуктов определяли флуориметрически (Флуорат-02-2М) [14].

Результаты и обсуждение

Анализ химического состава грунтов показал исчерпание фосфора (P_2O_5) в приповерхностном горизонте 0–0,2 м, что свидетельствует о более интенсивном росте микроорганизмов, в сравнении с нижним горизонтом, и окислении органических соединений, включая нефтепродукты (табл. 2). В грунтовых водах содержание фосфора снижалось при движении через загрязнённый грунт – 0,122; 0,074 и 0,042 мг/дм³ в скважинах 237, 159 и 239 соответственно, что также обусловлено потреблением фосфора микроорганизмами. Коэффициент парной корреляции между содержанием фосфора и показателями pH грунта составил $r = 0,89$. Калий (K_2O_5) присутствовал во всех образцах. Увеличение его концентрации в приповерхностном слое в среднем до 52,8 мг/кг в сравнении с горизонтом 0,4–0,6 м (32,8 мг/кг; ошибка измерения 1,0–2,6 мг/кг) вероятно, связано с выщелачиванием из грунта более активными здесь микроорганизмами.

Азот присутствовал в грунтах в аммонийной, нитратной и нитритной формах. Сред-

ние значения содержания нитратного азота, представленных в таблице 2, в поверхностном горизонте составляли 7,1 мг/кг и в нижнем – 3,7 мг/кг. То есть с глубиной происходило выраженное снижение на 2,0–6,8 мг/кг, которое многократно больше ошибки измерения (0,2–0,4 мг/кг). Такая динамика концентраций нитратов, вероятно, обусловлена увеличением активности денитрифицирующих микроорганизмов с глубиной. Также значительно изменялось содержание аммонийного азота, его средняя концентрация в поверхностном горизонте составляла 6,8 мг/кг, в нижнем – 8,3 мг/кг (погрешность измерения 0,3–0,4 мг/кг). Анализ химического состава грунтовых вод показал, что содержание аммонийной и нитратной форм азота изменяется в зависимости от удалённости от центра загрязнённой зоны. На периферии концентрация аммонийного азота составляла 0,07 мг/дм³, либо он не обнаруживался, а в центре очага – 1,7–5,1 мг/дм³. Нитратный азот в больших концентрациях 0,5–3,7 мг/дм³ определён на периферии, в центре – 0–2,5 мг/дм³. Накопление аммония в центре очага связано с биodeградацией азотсодержащих фракций нефтепродуктов, снижение его концентрации на периферии обусловлено более активной нитрификацией, для которой необходимо наличие кислорода [4].

Внесение удобрений положительно повлияло на численность микроорганизмов в грунтах и грунтовых водах, при этом более значительный отклик наблюдался у психрофилов. До обработки численность мезофильных УОМ и АМ была на порядок выше, чем психрофильных соответствующих экологотрофических групп ($p < 0,05$) (табл. 3). Однако после внесения удобрений численность

Таблица 2 / Table 2

Величина pH, содержание азота, фосфора и калия в грунтах, загрязнённых нефтепродуктами
pH and the Content of nitrogen, phosphorus, potassium of the petroleum products contaminated ground

№ образца Sample No.	№ скважины Well number	Горизонт, м Horizons, m	pH, ед. units	мг/кг / mg/kg			
				N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	237	0,0–0,2	8,2	10,0	11,0	0,0	93,0
2		0,4–0,6	9,6	7,5	8,5	14,0	53,0
3	159	0,0–0,2	8,4	5,0	7,8	0	32,0
4		0,4–0,6	9,1	7,5	1,0	10,0	23,0
5	589	0,0–0,2	8,6	6,0	8,0	0	50,0
6		0,4–0,6	8,5	6,0	6,0	0,0	26,0
7	238	0,0–0,2	8,4	8,0	5,5	0,0	60,0
8		0,4–0,6	9,5	11,5	2,0	14,0	37,0
9	240	0,0–0,2	8,5	5,0	3,0	0	29,0
10		0,4–0,6	8,6	9,0	1,0	10,0	25,0

Таблица 3 / Table 3

Численность бактерий и простейших в загрязнённых грунтах зоны аэрации
The number of microorganisms and protozoa in contaminated ground of aeration zone

Физиологические группы микроорганизмов Physiological groups of microorganisms	Период Time	Численность физиологических групп микроорганизмов (10^6 КОЕ/г) в разных горизонтах (м) / The number of microorganisms (10^6 CFU/g) in horizons (m)					
		0,2–1,0	1,0–1,2	1,9–2,3	2,9–3,2	3,9–4,2	4,9–5,1
Мезофильные АМ Mesophilic ammonifying	1*	7,3±0,4	1,04±0,15	1,12±0,16	1,76±0,19	1,90±0,61	2,4±0,22
	2**	38,3±18,5	–	4,22±1,92	7,21±0,52	3,08±0,31	18,7±10,6
Психрофильные АМ Psychrophilic Ammonifying	1	0,43±0,10	0,83±0,13	2,17±0,21	0,39±0,09	0,38±0,09	1,94±0,20
	2	2,64±0,86	–	3,85±1,86	13,7±1,13	3,29±1,13	4,15±1,84
Мезофильные УОМ Mesophilic hydrocarbon oxidizing	1	0,52±0,03	0,25±0,02	1,27±0,05	0,63±0,04	0,29±0,02	1,25±0,05
	2	2,26±1,02	–	3,09±1,46	2,47±0,37	1,47±0,59	2,37±0,42
Психрофильные УОМ Psychrophilic hydrocarbon oxidizing	1	0,13±0,02	0,14±0,02	0,64±0,04	0,22±0,02	0,18±0,02	0,20±0,02
	2	1,72±0,79	–	2,22±1,17	1,97±0,14	0,46±0,33	2,68±0,48
Zoomastigophorea (особей/г) / (cells/g)	1	10^1	10^1	10^1	10^1	10^2	10^1
	2	н.о.	–	10^1	10^2	н.о.	10^3

Примечание: 1* – до обработки, 2** – после обработки, н.о. – не обнаружено, прочерк – не определяли.
Notes: 1* – before treatment, 2** – after treatment, н.о. – nothing was observed, “–” numbers were not determined.

Таблица 4 / Table 4

Численность мезофильных и психрофильных бактерий в грунтовых водах скважины 159 ($\cdot 10^5$ КОЕ/мл) / The numbers of mesophilic and psychrophilic bacteria in the ground water of the well 159 ($\cdot 10^5$ CFU/mL)

Дата Date	Физиологические группы микроорганизмов / Physiological groups of microorganisms			
	мезофильные АМ mesophilic ammonifying	психрофильные АМ psychrophilic ammonifying	мезофильные УОМ mesophilic hydrocarbonoxidizing	психрофильные УОМ psychrophilic hydrocarbonoxidizing
23.6.05	1,45±0,05	0,74±0,05	1,26±0,21	0,60±0,32
30.8.05	13,90±0,40	13,00±1,60	9,66±4,55	1,07±0,86
23.9.05	380,00±22,00	6,68±5,70	31,60±18,00	3,18±2,90
1.10.05	20,50±6,50	8,08±2,73	6,20±2,60	0,78±0,55
23.5.06	1790,00±1040,00	886,00±443,00	231,00±140,00	71,60±44,00
31.10.06	208,00±133,00	2670,00±940,00	141,00±90,00	398,00±283,00

Примечание: АМ – аммонифицирующие микроорганизмы, УОМ – углеводородокисляющие микроорганизмы.

психрофильных АМ увеличилась на порядок ($p < 0,05$) и составила 10^6 – 10^7 КОЕ/г. Увеличение численности мезофильных АМ отмечалось только в верхнем горизонте и зоне насыщения. Численность мезофильных и психрофильных УОМ после внесения удобрений также увеличилась с 10^5 до 10^6 КОЕ/г ($p < 0,05$). При этом, наблюдалось увеличение доли психрофильных УОМ – на 13% ($p < 0,05$).

В грунтовых водах при внесении удобрений фиксировали большее увеличение численности микроорганизмов, при этом отклик психрофильных также был выше. Численность психрофильных УОМ увеличивалась с 10^4 до 10^7 , мезофильных – с 10^5 до 10^7 ; АМ – с 10^4 до 10^8 и 10^5 до 10^7 КОЕ/г соответственно

(табл. 4). Динамика численности психрофильных АМ и УОМ отличалась от мезофильных. Мезофильные микроорганизмы реагировали только на первое внесение удобрений, психрофильные – на каждое, и их численность достигала больших значений.

Для нарушенных сред характерно снижение численности и разнообразия простейших, регулирующих численность и структуру бактериальных сообществ [11]. На начало исследования в грунтах обнаруживались только жгутиконосцы р. *Bodo* (Zoomastigophorea), их численность изменялась в пределах 10 – 10^2 особей/г (табл. 3). В грунтовых водах численность р. *Bodo* была выше – 10^2 – 10^3 особей/мл. Наибольшая численность жгутико-

носцев фиксировалась в скважине 237, здесь же обнаруживались ресничные инфузории р. *Uronema* (Ciliata), их численность составляла 35 особей/мл. После внесения биогенных элементов в грунтах зоны аэрации численность жгутиконосцев изменилась: отмечались единичные особи в верхних горизонтах и 10^3 особей/г в нижних. В грунтовых водах численность жгутиконосцев увеличилась до 10^2 – 10^4 особей/мл. Вместе с этим возросла численность ресничных (Ciliata) до 10^2 – 10^3 особей/мл, которые обнаруживались в образцах воды из всех скважин. Также помимо р. *Uronema* появились инфузории р. *Colpoda*. Увеличение численности и разнообразия простейших обусловлено появлением в воде питательного субстрата, т. е. увеличением численности бактерий и содержания в воде легко окисляемых органических веществ, появившихся в результате биodeградации нефтепродуктов.

Стимуляция аборигенных микроорганизмов посредством удобрений способствовала интенсификации биodeградации. В течение трёх лет наблюдалось снижение концентрации нефтепродуктов в грунтовых водах на всём проблемном участке с 120–500 до 1,5–10,0 мг/дм³ [4]. В последующий период (2009–2019 гг.) работа по восстановлению геологической среды на территории ТЭЦ продолжилась. По наблюдениям 2018 г., только в отдельных скважинах на поверхности грунтовых вод в весенний период наблюдался слой нефтепродуктов мощностью не более 0,07 м, в остальных содержание нефтепродуктов соответствует фоновому. В особо загрязнённых наблюдательных скважинах (159 и 239) восстановилась фильтрация грунтовых вод, которая изначально отсутствовала.

Одновременно с увеличением численности и разнообразия микроорганизмов изменялись гидрохимические показатели грунтовых вод. Через 3–4 месяца после внесения удобрений наблюдалось увеличение содержания ионов аммония в очаге загрязнения до 50 мг/мл³ (скважина 159) и выше [4]. В дальнейшем отмечали последовательное увеличение концентрации аммония и в других скважинах. Появление аммония обусловлено биоразложением азотсодержащих нефтепродуктов. Повышенная концентрация ионов аммония наблюдалась только в пределах загрязнённой зоны. Восстановление концентрации аммония в грунтовой воде скважины 159 до фонового уровня происходило в течение 6–12 месяцев. Помимо этого, увеличивалась перманганатная окисляемость грунтовой воды, характери-

зующая содержание в воде легко окисляемых органических веществ, с 0,11–6,00 до 1,60–11,68 мгО₂/дм³. Это также служит свидетельством биоокисления нефтепродуктов. Высокие значения перманганатной окисляемости сохраняются до 10–12 лет.

В целом, достаточно простые биоремедиационные мероприятия по стимуляции аборигенной микрофлоры повышают интенсивность восстановления нефтезагрязнённой геологической среды. Содержание нефтепродуктов в течение 3-х лет снизилось более чем в 50 раз. Численность исследуемых аэробных групп бактерий увеличилась на 2–4 порядка. Численность АМ и УОМ в грунтах зоны аэрации достигала 10^7 и 10^6 КОЕ/г, в грунтовых водах 10^7 – 10^8 и 10^7 КОЕ/мл соответственно. При этом отклик психрофильных микроорганизмов на стимуляцию был выше, чем мезофильных. То есть именно им принадлежит ключевая роль в биоремедиации исследуемой геологической среды. Простейшие представляют следующий трофический уровень в микробоценозе и являются лимитирующим звеном в сложной цепи превращений углеводов. Установлено, что при биостимуляции их численность возрастает на 1–2 порядка и увеличивается разнообразие. Биореккультивация грунтов сопровождается изменением гидрохимических показателей грунтовых вод. В частности, в очаге загрязнения содержание ионов аммония и перманганатная окисляемость при разложении нефтепродуктов превышают ПДК. Это вторичное загрязнение грунтовых вод, которое возникает при биореккультивации, носит временный характер.

References

1. Ognyanik N.S., Paramonova N.K., Briks A.L., Pashkovsky I.S., Konnov D.V. The investigation basics of the light oil product pollution of the geological environment Kiev: A.P.N., 2006. 278 p. (in Russian).
2. Makushin Yu.V., Plevako G.L., Vaskina V.N., Lankin Yu.K. Assessment of groundwater pollution in the Siberian Federal District with oil products // *Razvedka i okhrana nedr.* 2007. No. 7. P. 45–48 (in Russian).
3. Shchuklina L.M., Batrakova G.M., Nurislamova T.N. Study of migration and transformation of greasing and cooling fluids in the soil of urbanized area // *Theoretical and Applied Ecology.* 2018. No. 4. P. 76–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-4-076-084
4. Trusey I.V., Gurevich Yu.L., Ladygina V.P., Lankin Yu.P., Fadeyev S.V. Analysis of the content of nitrate and ammonium ions at bioremediation of ground water polluted by oil products // *Chemistry for Sustainable De-*

velopment. 2017. V. 25. No. 2. P. 199–205. doi: 10.15372/KhUR20170212

5. Ovsyannikova V.S., Filatov D.A., Altunina L.K., Svarovskaya L.I. Biodestruction of hydrocarbons of highly viscous petroleum with soil microorganisms // *Chemistry for Sustainable Development*. 2014. No. 5. P. 489–495 (in Russian).

6. Brown L.D., Collogi D.L., Gee K.F., Urlich A.C. Bioremediation of oil spills on land // *Oil spill science and technology (Second edition)* / Ed. M. Fingas. Edmonton, AB, Canada: Spill Science, 2017. P. 699–729. doi: 10.1016/B978-0-12-809413-6.00012-6

7. Delin G.N., Essaid H.I., Cozzarelli I.M., Lahvis M.H., Bekins B.A. Ground water contamination by crude oil near Bemidji, Minnesota // *U.S. Geological Survey, Fact*. 1998. September. P. 84–98. doi: 10.3133/fs08498

8. Baker K.H., Herson D.S. In situ bioremediation of contaminated aquifers and subsurface soils // *Geomicrobiology Journal*. 1990. V. 8. No. 3–4. P. 133–146. doi: 10.1080/01490459009377891

9. *Manual of methods for general bacteriology* / Eds. F. Gerhardt, R.G. Murray, R.N. Costilow, E.W. Nester, W.A. Wood, N.R. Krieg G.B. Phillips. Washington, D.C.: American Society for Microbiology, 1981. 524 p.

10. Trusei I.V., Ladygina V.P., Gurevich Yu.L., Ozerskii A.Yu. Distribution of microorganisms in the oil-polluted ground of vadose and saturation zones // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. V. 2. No. 1. P. 22–26 (in Russian). doi: 10.1134/S1995425509010044

11. Hausmann K. *Protozoologie*. New York: Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1985. 340 p.

12. *Fauna of aerotanks (atlas)*. Leningrad: Nauka, 1984. 264 p. (in Russian).

13. *Workshop on Microbiology* / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 600 p. (in Russian).

14. *Methodical guidelines on the detection, examination, certification and assessment of the ecological hazard area of the geological environment contamination with oil products*. Moskva: GIDEK, 2002. 86 p. (in Russian).

Влияние ризосферных бактерий-нефтедеструкторов на биологическое состояние почвы, загрязнённой нефтью

© 2021. М. С. Третьякова¹, к. б. н., н. с., Л. А. Беловежец², к. б. н., с. н. с.,
Л. Г. Соколова¹, к. б. н., с. н. с., С. Ю. Зорина¹, к. б. н., с. н. с.,
Ю. А. Маркова¹, д. б. н., г. н. с., зав. лабораторией,
¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 132,
²Институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, д. 1,
e-mail: marina-tretjakova@yandex.ru

Нефть является опасным химическим загрязнителем почвы. В результате нефтеразливов происходит угнетение роста и развития растений, микроорганизмов и почвенных животных. В настоящее время широко применяют биологический метод, основанный на использовании эффективных микроорганизмов, в частности, выделенных из ризосферы растений, для восстановления загрязнённых территорий. В статье представлены результаты модельных экспериментов по влиянию ризосферных микроорганизмов-нефтедеструкторов на биологические свойства нефтезагрязнённой почвы и их использованию для целей биоремедиации. Показано, что в присутствии штаммов, относящихся к р. *Rhodococcus*, *Acinetobacter* и их консорциума, происходило повышение эффективности разложения углеводов нефти в загрязнённой почве. Убыль нефти в загрязнённой почве за 60 суток эксперимента при внесении исследованных штаммов увеличивалась на 19–24% относительно контроля и составила 62–68% от исходного её содержания. Наблюдалось увеличение активности каталазы, пероксидазы, полифенолоксидазы, происходило повышение эмиссии углекислого газа. Штаммы микроорганизмов в основном способствовали снижению фитотоксичности почвы. На протяжении всего эксперимента наименьшей фитотоксичностью обладала почва, инокулированная *Rhodococcus erythropolis* штамм 108. Выделенные ризосферные штаммы депонированы во Всероссийской коллекции микроорганизмов Института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН, ФГБУН «ФИЦ «Пушчинский научный центр биологических исследований РАН» и являются перспективными для использования в качестве биоремедиантов нефтезагрязнённых территорий Сибирского федерального округа.

Ключевые слова: ризосферные микроорганизмы-нефтедеструкторы, нефтезагрязнённая почва, биологические свойства почвы, биодеструкция нефти.

Effect of rhizospheric oil-degrading bacteria on the biological state of oil-polluted soil

© 2021. M. S. Tretyakova¹ ORCID: 0000-0003-1222-3589^{*}
L. A. Belovezhets² ORCID: 0000-0001-5922-3397^{*}, L. G. Sokolova¹ ORCID: 0000-0002-5178-1404^{*}
S. Yu. Zorina¹ ORCID: 0000-0002-7587-981X^{*}, Yu. A. Markova¹ ORCID: 0000-0001-7767-4204^{*}
¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry Siberian Branch of RAS,
132, Lermontova St., Irkutsk, Russia, 664033,
²Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of RAS,
1, Favorsky St., Irkutsk, Russia, 664033,
e-mail: marina-tretjakova@yandex.ru

Environmental pollution with oil and oil products is a serious issue faced both by Russia and by the whole world. Currently, the use of microbiological preparations, which include indigenous microorganisms adapted to climatic and environmental conditions of a particular region, is an effective way to remediate oil-polluted soils. The use of microorganisms isolated from plant rhizosphere is promising for soil bioremediation due to their high biotechnological potential. The paper presents the results of model experiments on the influence of strains of oil-degrading microorganisms (*Rhodococcus erythropolis* 108, *Acinetobacter guillouiae* 112, *Acinetobacter guillouiae* 114) isolated from wheatgrass rhizosphere and their consortium on the purification of oil-polluted soil. The changes in soil enzymatic and respiratory activity are the indicators of its phytotoxicity. After 60 days of the experiment, the oil loss in oil-polluted soil with the introduction of the studied strains was shown to increase by 19–24% relative to the control and amount to 62–68% of its initial content.

The enzymatic and respiratory activity of the soil increased at the background of oil destruction by the microorganisms. Treatment of oil-polluted soil with the strains of oil-degrading bacteria contributed to an increase in its phytotoxicity in the early stages of radish (*Raphanus sativus*) ontogeny. This was especially characteristic of the *A. guillouiae* 112 strain. The soil inoculated with *R. erythropolis* 108 had the least phytotoxicity throughout the experiment. For the first time, the obtained rhizospheric strains of the genera *Rhodococcus* and *Acinetobacter* were shown to accelerate the process of purifying the soil from oil and be able to be used for bioremediation of oil-polluted soils.

Keywords: rhizospheric oil-degrading microorganisms, oil-polluted soil, soil biological properties, oil biodegradation.

В результате аварий на нефтепроводах, при добыче и транспортировке в России ежегодно теряется около 1,5 млн т нефти. В 80% случаев загрязнению подвергается почва [1]. При загрязнении почвы нефтепродуктами изменяются её физические и морфологические свойства, нарушается воздухообмен, затрудняется поступление воды, питательных веществ, необходимых для жизнедеятельности почвенных животных и растений [2, 3]. Почвы теряют своё плодородие и сельскохозяйственное значение [4, 5].

Для ускорения процесса самоочищения в настоящее время применяют углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ), обладающие повышенной способностью к деградации ксенобиотиков [6–8]. Этот метод признан в мире как наиболее экологически безопасный для окружающей среды и экономически целесообразный [9–11]. Активные виды УОМ выделяют непосредственно из нефтезагрязнённой почвы. Также имеются данные, что в ризосфере растений численность УОМ, способных к деградации загрязняющих веществ, существенно больше, чем вне её [12, 13].

В Иркутском регионе за последние годы зарегистрировано около 30 нефтяных аварий. На данной территории имеется 12 крупных нефтяных месторождений, проходят две линии подземного магистрального нефтепровода, которые проложены на сельскохозяйственных и лесных землях [14]. Поэтому создание микробиологического препарата, разработанного для восстановления нефтезагрязнённых территорий, является актуальным для Иркутской области. Важно при внедрении таких препаратов знать влияние выделенных УОМ на биологические свойства почвы, что позволит спрогнозировать эффективность данного препарата для очищения почвы от загрязнителя.

Цель работы – изучение влияния ризосферных микроорганизмов-нефтедеструкторов на биологические свойства загрязнённой почвы.

Объекты и методы исследования

В работе использовали штаммы УОМ, выделенные из ризосферы пырея (*Elytrigia*

repens), произрастающего на территории Иркутской области [15]: *Rhodococcus erythropolis* 108, *Acinetobacter guillouiae* 112, *Acinetobacter guillouiae* 114.

Варианты эксперимента: 1. Незагрязнённая почва; 2. Почва, загрязнённая нефтью, без бактерий; 3. Загрязнённая почва (ЗП) + *R. erythropolis* 108; 4. ЗП + *A. guillouiae* 112; 5. ЗП + *A. guillouiae* 114; 6. ЗП + консорциум микроорганизмов (*R. erythropolis* 108+ *A. guillouiae* 112+ *A. guillouiae* 114). Один раз в неделю проводили отбор образцов на определение интенсивности эмиссии CO₂, один раз в две недели определяли фитотоксичность почвенного экстракта; через 5 и 60 сут после внесения нефти – ферментативную активность почвы (пероксидаза, каталаза, полифенолоксидаза), через 60 сут – убыль нефти.

Для эксперимента использовали нестерильную серую лесную почву (гумус 7,52%; N_{общ} 0,35%, C : N = 15, рН_{вод.} 5,7), в количестве 200 г, которую загрязняли нефтью в концентрации 10% об. Затем почву инокулировали суспензией соответствующего микроорганизма-деструктора или их ассоциацией с титром 10⁷ КОЕ/г, в объёме 20 мл. Эксперимент проводили в течение 60 сут при температуре 26 °С в климатической камере CLF Plant Climatics (Германия). Для определения фитотоксичности почвенного раствора использовали семена редиса (*Raphanus sativus*, сорт Дуро краснодарское) [16]. Количество взошедших семян учитывали на 3-й день. Активность каталазы определяли перманганатометрически, полифенолоксидазы и пероксидазы – иодометрически [17]. Определение эмиссии CO₂ проводили абсорбционным методом, адаптированным для условий *in exp* [18]. Остаточное содержание нефти в почве анализировали через 60 сут гравиметрическим методом [19]. Статистическая обработка данных выполнена с использованием стандартного пакета программы Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Одним из основных показателей эффективности работы бактерий-нефтедеструкторов

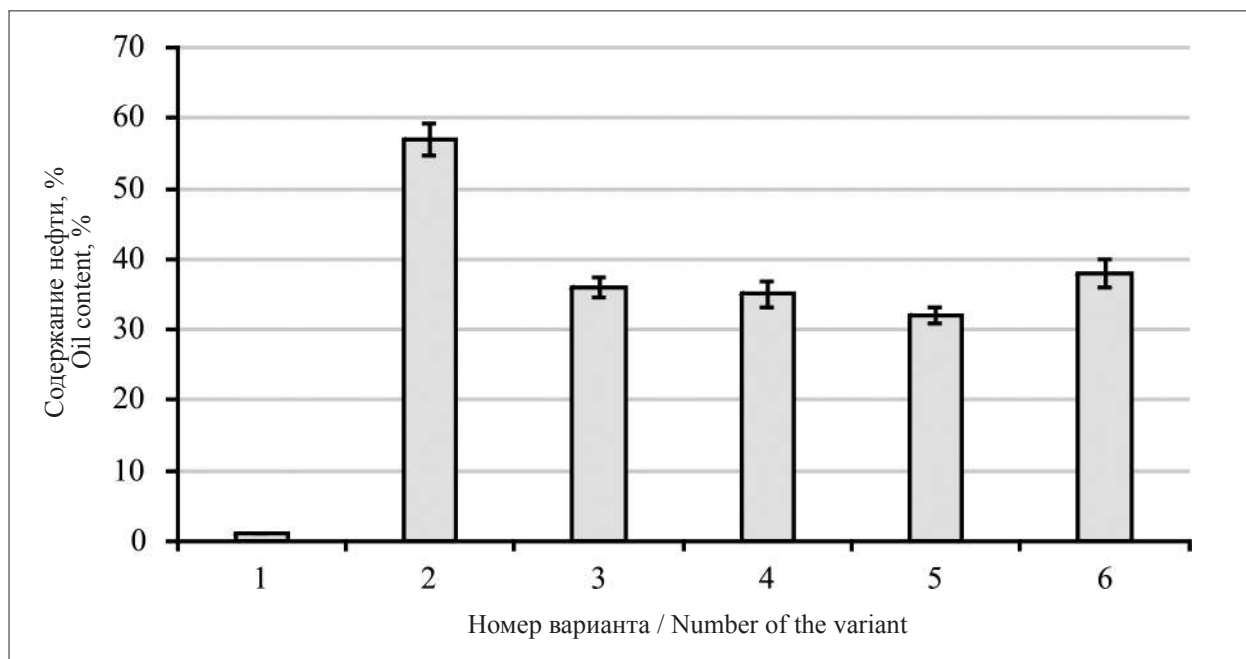


Рис. 1. Остаточное содержание нефти в почве через 60 сут эксперимента (%).
Исходное содержание нефти – 100%
Fig. 1. Residual oil content in the soil after 60 days of the experiment (%).
The initial oil content is 100%

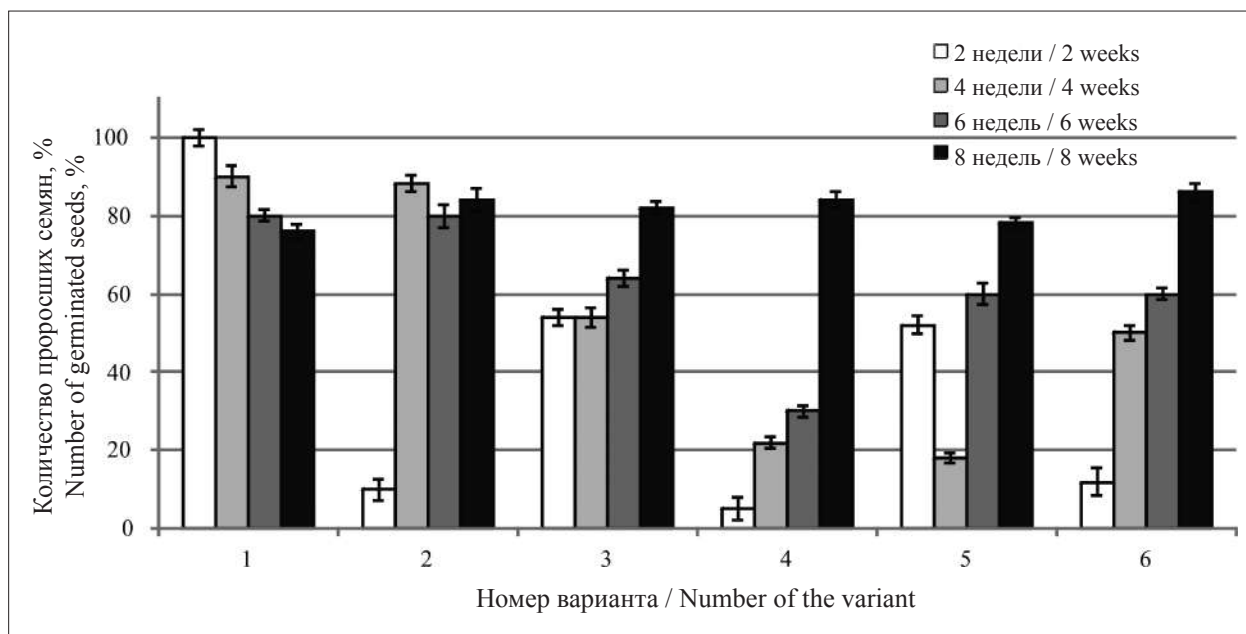


Рис. 2. Определение фитотоксичности почвенного раствора по количеству проросших семян редиса (%)
Fig. 2. Determination of phytotoxicity of soil solution by number of germinated radish seeds (%)

является убыль нефти в почве. Было показано, что при внесении УОМ убыль нефти составляла 19–24% относительно контроля (рис. 1).

В процессе биodeградации нефти образуется большое количество высокотоксичных

соединений, поэтому определение уровня фитотоксичности может служить косвенным показателем активности разложения нефти в почве. В данном эксперименте о фитотоксичности судили по оценке прямого токсического

эффекта водной почвенной вытяжки на семена редиса (*R. sativus*) (рис. 2).

Отмечено, что через две недели после внесения нефти, почвенный раствор оказался наиболее токсичным для прорастания семян редиса. Возможно, это связано с быстро разлагаемой фракцией нефти, продукты деструкции которой неблагоприятно действуют на растения [20]. Обработка нефтезагрязнённой почвы отдельными штаммами бактерий-нефтедеструкторов существенно изменяла её фитотоксичность. Наиболее высокой она была в варианте с внесением штамма *A. guillouiae* 112. Ранее было установлено [15], что этот штамм обладал высокой скоростью биодеструкции нефти. Снижение фитотоксичности в этом варианте происходило только в конце эксперимента. В присутствии *A. guillouiae* 114 максимальное токсическое воздействие наблюдалось через четыре недели. Несмотря на принадлежность этих штаммов к одному виду, они используют разные пути разложения ароматических соединений нефти [21], что объясняет различия в динамике фитотоксичности. Наименьшей фитотоксичностью на протяжении всего эксперимента обладала почва, инокулированная штаммом *R. erythropolis* 108, что может быть связано с его защитным действием

на растения в условиях нефтезагрязнения [22]. В случае использования консорциума УОМ в первые две недели происходило резкое увеличение фитотоксичности почвы, затем она постепенно снижалась. Через восемь недель фитотоксичность почв практически не отличалась от контроля (рис. 3).

Для выявления эффективности биоремедиации нефтезагрязнённых почв используют показатели пероксидазной, каталазной и полифенолоксидазной активности почвы [23, 24]. Незагрязнённая почва практически не обладала пероксидазной активностью, тогда как активность полифенолоксидазы и каталазы находилась на среднем уровне (рис. 3). Через пять суток после внесения нефти в почву активность исследуемых ферментов резко возрастала. По-видимому, это может быть связано с активизацией почвенной микрофлоры, вынужденной в короткие сроки нейтрализовать большое количество токсичных соединений. Через два месяца эксперимента активность исследуемых ферментов снижалась. Обработка загрязнённой почвы штаммом *A. guillouiae* 112 приводила к возрастанию активности всех трёх ферментов. Как показано ранее [15, 21], данный штамм характеризуется высокой скоростью деструкции ароматической

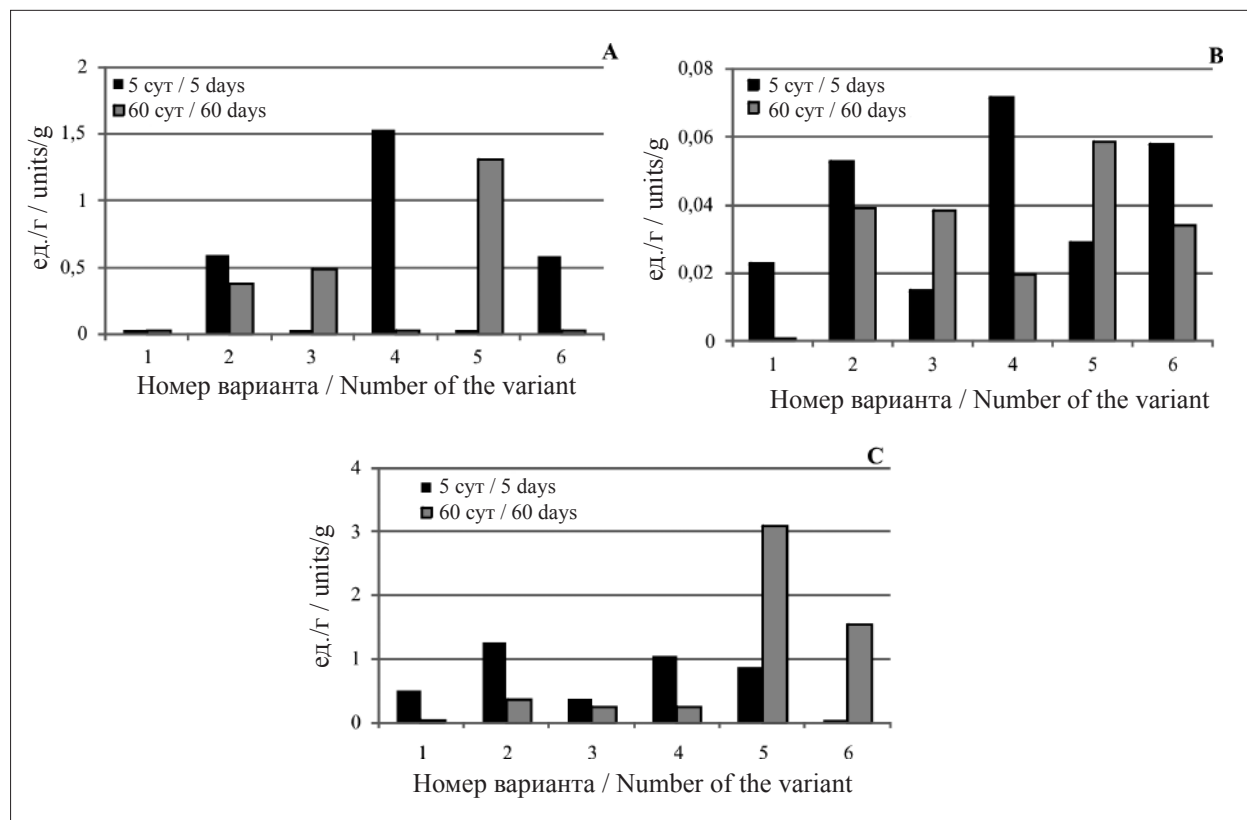


Рис. 3. Ферментативная активность почвы: А – пероксидаза, В – каталаза, С – полифенолоксидаза
Fig. 3. Enzymatic activity of the soil: A – peroxidase, B – catalase, C – polyphenol oxidase

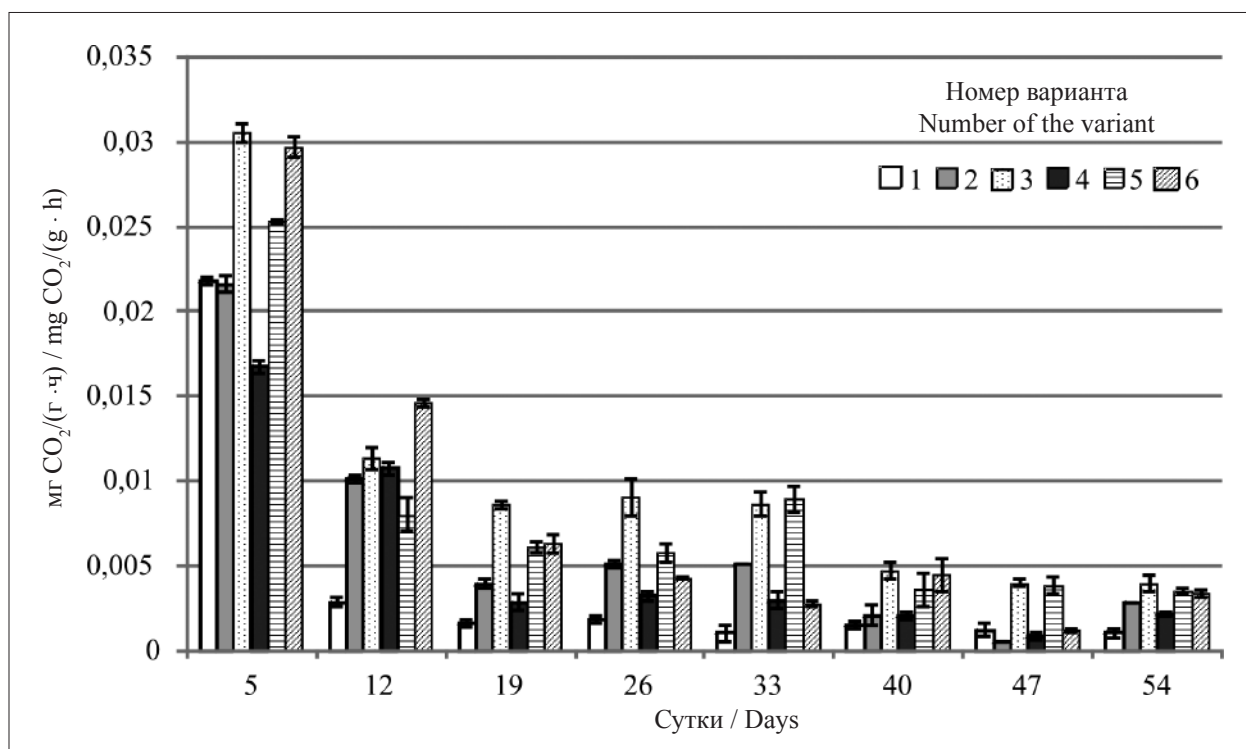


Рис. 4. Интенсивность эмиссии CO₂ / Fig. 4. CO₂ emission rate

составляющей нефти, что способствует выделению в водную фазу большого количества низкомолекулярных фенольных соединений, являющихся продуктами и субстратами исследуемых ферментов. Вещества фенольного типа, как правило, токсичны для растений, что подтверждается максимальной фитотоксичностью почвы в этот период.

При внесении штамма *A. guillouiae* 114 наблюдалась обратная картина, что, возможно, связано с различными путями деградации компонентов нефти этими УОМ [21]. Максимальная активность ферментов приходилась на конец исследования. Внесение в нефтезагрязнённую почву штамма *R. erythropolis* 108 практически не влияло на активность ферментов. Введение консорциума микроорганизмов увеличивало активность пероксидазы и каталазы аналогично действию штамма *A. guillouiae* 112, однако активность полифенолоксидазы увеличивалась лишь к концу эксперимента.

Углекислый газ является конечным продуктом разложения нефти, поэтому по интенсивности дыхания можно судить о процессе восстановления почвы в ходе её очистки [25]. Как видно из рисунка 4, показатель эмиссии CO₂ в незагрязнённой почве в течение всего эксперимента снижался от 0,021 до 0,002 мг CO₂ / (г · ч). Подобная динамика эмис-

сии CO₂, связанная с истощением доступного субстрата, характерна для инкубационных экспериментов [26]. Загрязнение почвы сырой нефтью на протяжении всего эксперимента способствовало повышению уровня дыхания почвы в среднем в 2,5 раза. По-видимому, за счёт увеличения содержания доступного для микробиоценоза органического углерода активизировалась углеводородокисляющая аборигенная микрофлора. Внесение штамма *R. erythropolis* 108 стимулировало эмиссию углекислого газа на 74% относительно загрязнённой нефтью почвы. Высокий уровень эмиссии CO₂ отмечали при внесении в почву штамма *A. guillouiae* 114 и консорциума УОМ. Внесение штамма *A. guillouiae* 112, напротив, способствовало подавлению эмиссии CO₂ относительно загрязнённой нефтью почвы (рис. 4). При этом подавление эмиссии по времени совпадало с периодом высокой фитотоксичности.

Заключение

Инокуляция нефтезагрязнённой почвы ризосферными штаммами УОМ приводит к изменению её биологических свойств, по сравнению с неинокулированной почвой [27]. Согласно полученным результатам, при внесении штаммов *R. erythropolis* 108, *A. guillouiae* 112, *A. guillouiae* 114 и их консорциума

в нефтезагрязнённой почве, как правило, происходит активация оксидоредуктазных ферментов и повышение эмиссии CO_2 . Это является следствием ускорения разложения нефти, сопровождающегося усилением фитотоксичности почвы. К концу эксперимента большинство показателей возвращается к уровню незагрязнённой почвы, что можно расценивать как успешную ликвидацию нефтяного загрязнения. Соответственно, процессы, которые в природных условиях затягиваются на десятилетия, при использовании выделенных нами штаммов УОМ происходят в течение 2–3 месяцев и приводят к восстановлению основных биологических свойств почвы.

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования (ЦКП) «Биоаналитика» Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (Иркутск, Россия).

Работа выполнена в рамках проекта под № гос. регистрации АААА-А17-117011810099-8.

References

1. Lu L., Yazdi H., Jin S., Zuo Y., Fallgren P.H., Ren Z.J. Enhanced bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil using pilot-scale bioelectrochemical systems // *Hazardous Materials*. 2014. V. 274. P. 8–15. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.03.060
2. Laffon B., Pasaro E., Valdiglesias V. Effects of exposure to oil spills on human health: updated review // *Toxicology and Environmental Health. Part B*. 2016. V. 19. P. 105–128. doi: 10.1080/10937404.2016.1168730
3. Shulz M., Fleet D.M., Camphuysen K.C., Schulze-Dieckhoff M., Laursen K. Wadden Sea quality status report: oil pollution and seabirds // *Wadden Sea quality status report*. Wilhelmshaven. Germany: Common Wadden Sea Secretariat, TMAP. 2017. P. 1–13.
4. Suleymanov R.R., Shorina T.S. The effect of oil pollution on the dynamics of biochemical processes of ordinary chernozem (Orenburg region) // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. V. 1. P. 240–243 (in Russian).
5. Tiralerdpanich P., Sonthiphan P., Luepromchai E., Pinyakong O. Potential microbial consortium involved in the biodegradation of diesel, hexadecane and phenanthrene in mangrove sediment explored by metagenomics analysis // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. V. 133. P. 595–605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.06.015
6. Fuentes S. Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014. V. 11. P. 4781–4794. doi: 10.1007/s00253-014-5684-9
7. Xenia M. Microorganisms metabolism during bioremediation of oil contaminated soils // *Bioremediation & Biodegradation*. 2016. V. 7. P. 1–6.
8. Varjani S.J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons // *Bioresource Technology*. 2017. V. 223. P. 277–286. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037
9. Koshlaf E., Ball A.S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted // *AIMS Microbiology*. 2017. V. 3. P. 25–49. doi: 10.3934/microbiol.2017.1.25
10. Wang J., Shen X., Rey J., Yuan Q., Yan Y. Recent advances in microbial production of aromatic natural products and their derivatives // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. V. 102. P. 47–61.
11. Reyes-Sosa M.B., Apodaca-Hernandez J.E., Arena-Ortiz Ma.L. Bioprospecting for microbes with potential hydrocarbon remediation activity on the north-west coast of the Yucatan Peninsula, Mexico, using DNA sequencing // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 642. P. 1060–1074. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.097
12. Mikolasch A., Omirbekova A., Schumann P., Reinhard A., Sheikhany H., Berzhanova R., Mukasheva T., Schauer F. Enrichment of aliphatic, alicyclic and aromatic acids by oil-degrading bacteria isolated from the rhizosphere of plants growing in oil-contaminated soil from Kazakhstan // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2015. V. 9. P. 4071–4084. doi: 10.1007/s00253-014-6320-4
13. Bisht S., Pandey P., Bhargava B., Sharma S., Kumar V., Sharma K.D. Bioremediation of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2015. V. 46. P. 7–21. doi: 10.1590/S1517-838246120131354
14. Granina N.I., Vasilyev M.B. Problema otsenki neftezagryazneniya pochv v Irkutskom regione // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. No. 8. P. 67–71 (in Russian).
15. Tretyakova M.S., Belovezhets L.A., Markova Yu.A. Screening bacteria associated with plants by the ability to degrade oil components // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2015. No. 4. P. 138–142 (in Russian).
16. Mineev V.G., Sychev V.G., Amelyanchik O.A., Bolysheva T.N., Gomonova N.F., Durymina E.P., Egorov B.C., Egorova E.V., Edemskaya N.L., Karpova E.A., Prizhukova V.G. Workshop on Agrochemistry. Moskva: MGU, 2001. 689 p. (in Russian).
17. Khaziye F.Kh. Soil enzymology methods. Moskva: Nauka, 1990. 192 p. (in Russian).
18. Purtova L.N., Kostenkov N.M. CO_2 emission from soils of natural landscapes in the South of Primorye // *Vestnik KrasGAU*. 2013. V. 10. P. 64–68 (in Russian).
19. Drugov Yu.S., Rodin A.A. Environmental analyzes during oil and oil product spills. Moskva: Binom, 2014. 270 p. (in Russian).
20. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F., Aznaryan D.K., Zharkova M.G. Biodiagnosis of ecological condition of soils contaminated with oil and oil products. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2007. 192 p. (in Russian).
21. Belovezhets L.A., Makarova L.E., Tretyakova M.S., Markova Yu.A., Dudareva L.V., Semenova N.V. Possible ways of destruction of polyaromatic hydrocarbons of oil

by certain types of oil-degrading bacteria isolated from plant endo- and rhizospheres // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2017. V. 53. No. 1. P. 1–6 (in Russian). doi: 10.7868/S0555109917010068

22. Tretyakova M.S., Belovezhets L.A., Markova Yu.A., Makarova L.E. Investigation of the ability of oil destructive bacteria to reduce the toxic effect of oil on plants // *Agrokhimiya*. 2017. V. 12. P. 56–61 (in Russian). doi: 10.7868/S0002188117120079

23. Loginova T.T. The use of *Acinetobacter* strains for bioremediation of oil-contaminated soils in the territory of the Voronezh region // *Vestnik VGU*. 2011. V. 2. P. 127–133 (in Russian).

24. Zhang X., Liu Z., Trung Luc N., Liang X., Liu L.X. Dynamics of the biological properties of soil and the nutri-

ent release of *Amorpha fruticosa* L. litter in soil polluted by crude oil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. No. 21. P. 16749–16757. doi: 10.1007/s11356-015-4874-z

25. Akhmediyev M.V. Assessment of respiration rate of oil-contaminated soils // *Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2014. V. 4. P. 165–176 (in Russian).

26. Blagodatskaya E.V., Semenov M.V., Yakushev A.V. The activity and biomass of soil microorganisms in changing environmental conditions. **Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaviy KMK**, 2016. 243 p. (in Russian).

27. Novosyolova E.I., Kireeva N.A. Enzymatic activity of soils in conditions of oil pollution and its biodiagnostic significance // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 2. P. 4–12. doi: 10.25750/1995-4301-2009-2-004-012

**Биоутилизация органических отходов личинками мухи
Hermetia illucens и возможность применения образованного
зоокомпоста против фитонематод**

© 2021. Н. А. Ушакова¹, д. б. н., г. н. с., С. В. Зиновьева¹, д. б. н., г. н. с.,
Ж. В. Удалова^{1,2}, к. б. н., с. н. с., А. И. Бастраков¹, н. с., А. И. Бутенко¹, вед. инженер,

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН,

119071, Россия, г. Москва, Ленинский пр., д. 33,

²ВНИИП – филиал ФГБНУ ФНЦ ВИЭВ РАН,

117218, Россия, г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 28,

e-mail: naushakova@gmail.com

Личинки мухи чёрной львинки *Hermetia illucens* эффективно используют в качестве кормового субстрата фруктово-овощные смеси – отходы торговых сетей, в том числе, заражённые нематодами. Показано, что личинки способны с высокой скоростью утилизировать картофель (за 12 суток достигается 70% конверсия субстрата) и полностью элиминировать в поражённом корнеплоде как фитопатогенную картофельную нематоду *Ditylenchus destructor*, так и сапробиотическую нематоду *Rhabditis* spp., которые ухудшают товарные свойства картофеля и других корнеплодов при хранении. В контрольном субстрате без личинок чёрной львинки фитопатогенные нематоды за исследуемый период сохранились, а сапробиотические нематоды размножились. Внесение полученного из фруктово-овощных отходов зоокомпоста (экскрементов личинок с остатками непереваренного субстрата) в почвогрунт снижает заражённость томатов галловой нематодой *Meloidogyne incognita*. Показана перспективность использования зоокомпоста для стимуляции роста и развития растений, и особенно растений, страдающих от нематодной инвазии.

Ключевые слова: фруктово-овощные отходы, личинки, *Hermetia illucens*, биоутилизация, нематоды, *Ditylenchus destructor*, *Rhabditida*, *Meloidogyne incognita*, томаты.

**The biodisposal of organic waste by larvae
of the black soldier fly *Hermetia illucens* and the possibility
of using the formed zoocompost against phytonematodes**

© 2021. N. A. Ushakova¹ ORCID: 0000-0001-7914-1508, S. V. Zinovieva¹ ORCID: 0000-0002-0969-4569²

Zh. V. Udalova^{1,2} ORCID: 0000-0002-8254-4495, A. I. Bastrakov¹ ORCID: 0000-0001-9647-0805²

A. I. Butenko¹ ORCID: 0000-0002-2729-389X²

¹Federal Budgetary Institution of Science A. N. Severtsov Institute
of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences,
33, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119071,

²Research Institute of Fundamental and Applied Parasitology of Animals and Plants –
branch of the All-Russian Research Institute of Experimental Veterinary RAS,
28, Bolshaya Cheremushkinskaya St., Moscow, Russia, 117218,
e-mail: naushakova@gmail.com

Larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens* effectively use fruit and vegetable mixtures – waste of retail chains as a feed substrate, including those infected with nematodes. It is shown that the larvae are capable to dispose of the potatoes with high speed (for the 12 day it is reached 70% conversion of substrate) and completely eliminate in the affected root as the potato plant pathogenic nematode *Ditylenchus destructor* and saprobic nematode *Rhabditis* spp., which impair the commercial properties of potatoes and other root crops during storage. In the control substrate without larvae of the black soldier fly phytopathogenic nematodes were preserved during the study period, and saprobic nematodes have been multiplied. Introduction of zoocompost obtained from fruit and vegetable waste (excrements of the larvae with the remains of undigested substrate) to the soil reduces the infectivity of tomato root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. The introduction of compost under the root system immediately before the infection of the 2-month tomato seedlings reduced the negative impact of the nematode, the plants were more powerful than the infected control. Plants treated with zoocompost at a dose of 6.5 g/plant were particularly distinguished: the mass of their above-ground part and the height

of the stem was close to uninfected control. The prospects of using zoocompost to stimulate the growth and development of plants, and especially plants suffering from nematode invasion, have been shown.

Keywords: fruit and vegetable waste, larvae, *Hermetia illucens*, bioutilization, nematodes, *Ditylenchus destructor*, *Rhabditida*, *Meloidogyne incognita*, tomatoes.

Накопление пищевых отходов, отходов овощных баз, просроченных или утративших свои потребительские свойства продуктов – одна из важнейших проблем современных городов, которая приводит к биологическому загрязнению окружающей среды. В последнее десятилетие активно развиваются технологии применения личинок мухи чёрной львинки *Hermetia illucens* для переработки различных органических субстратов [1–3]. Личинки *H. illucens* являются сапрофагами широкого спектра, питающиеся органическими остатками растительного и животного происхождения. Важным фактором, определяющим перспективность использования этого насекомого для утилизации отходов, является возможность разведения мухи в культуре в производственных условиях [4]. Развиваясь в органических отходах, личинки чёрной львинки могут вступать в контакт с различными организмами, заселяющими субстрат (бактериями, грибами и др.). В связи с заражённостью остатков растительной продукции нематодами, среди которых могут быть и патогенные виды, вопрос о влиянии личинок чёрной львинки на заражённость субстрата этими беспозвоночными вызывает особый интерес.

Стеблевая картофельная нематода *Ditylenchus destructor* – широко распространённый паразит растений. Наибольший ущерб эта нематода причиняет картофелю [5]. Картофель заражается стеблевой нематодой в основном в почве во время вегетации, и это является причиной серьёзного снижения урожайности. А в период хранения клубней паразит массово в них развивается, и является причиной гнилей, поскольку открывает ворота для сапрозойных организмов, в том числе, сапробиотических нематод [6].

Обогащение почвы биологически активными продуктами выделения личинок *H. illucens*, которые содержатся в зоокомпосте, может изменить почвенную биоту и сделать её непривлекательной для развития патогенных видов нематод.

Зоокомпост состоит из остатков непереваренного кормового субстрата, экскрементов личинок, остатков хитинового наружного покрова насекомого при метаморфозе личиночная стадия *H. illucens* насчитывает 6 возрастов;

во время линьки происходит сбрасывание наружной оболочки и обогащение зоокомпоста хитином [7]. Известно, что внесение хитина в почву эффективно против фитопаразитических нематод [8]. Отмечено, что зоокомпост перспективен для использования в качестве стимулятора роста и развития растений [9]. В связи с этим актуально изучение влияния этого зоокомпоста на один из наиболее патогенных видов нематод – галловую нематоду *Meloidogyne incognita*.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей взаимодействия личинок чёрной львинки *H. illucens* с картофельной нематодой *D. destructor*, сапробиотическими нематодами *Rhabditis* spp. при их совместном развитии на картофельном субстрате и фруктово-овощных смесях и изучение свойств зоокомпоста в борьбе с галловой нематодой *M. incognita*. Данные в литературе о взаимодействии этих видов беспозвоночных отсутствуют.

Материалы и методы исследования

Для оценки биоконверсии картофельного субстрата и жизнеспособности фитонематод в период жизнедеятельности личинок львинки в контейнеры размером: длина–ширина 7 × 10 см (площадь 70 см²), и объёмом 500 мл вносили 150 г субстрата, состоящего из измельчённого картофеля, сбалансированного добавлением пшеничных отрубей для получения массы влажностью 65%, и заселяли 6-ти дневными личинками мухи *H. illucens* средней массой 6,00±0,58 мг (по 280 экземпляров в каждый контейнер, что обеспечивало плотность посадки личинок 4 экз./см²). По вариантам по поверхности субстрата распределяли водную суспензию нематод (по 3 мл): вариант 1 – сапробиотические нематоды (в основном *Rhabditis* spp.) около 4 тыс. особей; вариант 2 – фитогельминт *D. destructor* порядка 4 тыс. особей; вариант 3 – только личинки львинок без нематод (вносили 3 мл воды); вариант 4 – смесь *D. destructor* около 3 тыс. особей и около 1 тыс. особей *Rhabditis* spp. без личинок львинки. Повторность – трёхкратная.

Выращивание личинок на фруктово-овощной смеси производства ООО «Экобелок»

(Россия) осуществляли аналогично описанному для картофельного субстрата варианту 3 без нематод.

Продолжительность развития личинок определяли по динамике температуры субстрата и отсутствию/наличию предкуколок (особей тёмного цвета среди светлых личинок). Определение содержания предкуколок проводили путём визуальной оценки их присутствия и подсчётом количества экземпляров данной формы в произвольной выборке из 50 личинок. О завершении процесса переработки личинками *H. illucens* картофельной смеси судили по снижению температуры субстрата до начальной температуры субстрата и по появлению первых предкуколок. Температуру субстрата в контейнере контролировали логгерами температуры DS1922L-F5 (Россия). Величину конверсии кормового субстрата личинками *H. illucens* определяли по разнице между высушенной исходной кормовой массой и полученным высушенным остатком после отделения выросших личинок, выраженной в процентах от сухой исходной массы. Анализ зоокомпостов на наличие живых нематод проводили сразу после отделения личинок *H. illucens* из остаточной массы субстрата (образованного зоокомпоста). Для этого каждый вариант переработанного личинками субстрата был перенесён на сито, и по методу [10] осуществляли экстракцию нематод для дальнейшего анализа. Полученную после биоконверсии массу заморозили при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в дальнейшем использовали для анализа её действия на галловую нематоду на растениях томата.

Для оценки способности зоокомпостов, содержащих продукты жизнедеятельности личинок чёрной львинки *H. illucens*, подавлять развитие галловой нематоды *M. incognita*, 2-х месячную рассаду томатов F1 Гамаюн, восприимчивых к галловой нематоды (индекс устойчивости к галловой нематоды 30%), высаживали в отдельные вазоны объёмом 500 мл в почвогрунт, предназначенный для выращивания томатов. Одновременно по вариантам под корневую систему томатов вносили зоокомпосты, полученные при выращивании личинок на фруктово-овощной смеси производства ООО Экобелок и зоокомпост, полученный в предыдущем эксперименте. Было составлено 4 варианта: высушенный на воздухе при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ зоокомпост, полученный на фруктово-овощных смесях, в дозе 6,5 и 13 г/растение; этот же зоокомпост, термически обработанный при $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении часа в

дозе 6,5 г/растение; зоокомпост, полученный в предыдущем эксперименте на картофельном субстрате, замороженный при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и размороженный перед внесением в почвогрунт, в количестве 6,5 г/растение. Растения заражали галловой нематодой *M. incognita* в количестве 1000 особей/растение. Галловую нематоду поддерживали на культуре томатов в лабораторных условиях. Контроль – заражённые и здоровые растения без обработки зоокомпостами. Повторность шестикратная. Растения выращивали в лабораторных условиях при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, поддержании 70% влажности и фотопериода 16/8 ч [11]. Через 40 сут провели учёт биометрических показателей растений (вес и длина). С помощью стереоскопического микроскопа Carl Zeiss провели оценку заражённости корневой системы томатов *M. incognita* (число галлов на грамм корня) и морфофизиологическое состояние нематод (размер самок и их плодовитость).

Статистическую обработку осуществляли по программе STATISTICA 8. Разницу между опытными вариантами оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа Ано-ва. Зависимость основных параметров друг от друга осуществляли с помощью корреляции Пирсона. Проверку данных на нормальность проводили с помощью Shapiro-Wilk's теста.

Результаты и обсуждение

На 12-е сут эксперимента на картофельном субстрате и фруктово-овощной смеси насекомые завершили их биоконверсию, поскольку температура упала до температуры начальной кормовой смеси (рис. 1) и появились предкуколки, которые имеют тёмную окраску и уже не питаются.

Средняя конверсия высушенного субстрата составила $70,5\pm 0,4\%$, разница между вариантами не достоверна. Из 1 кг сырого картофельного субстрата с начальной влажностью 65% получено $261,4\pm 2,8$ г сухой биомассы личинок в вариантах с нематодами и без них, а из 1 кг сырой фруктово-овощной смеси, влажностью 70% – $258,5\pm 8,8$ г, однако разница между вариантами не достоверна. При переработке 1 кг сырого субстрата, независимо от его типа, образовалось в среднем $296,9\pm 4,5$ г зоокомпоста влажностью $35,4\pm 4,6\%$. Значение pH зоокомпоста при развитии личинок на картофельном субстрате составило $8,5\pm 0,1$, а на фруктово-овощной смеси pH – $6,9\pm 0,6$ ед. В последнем варианте нейтральное значение

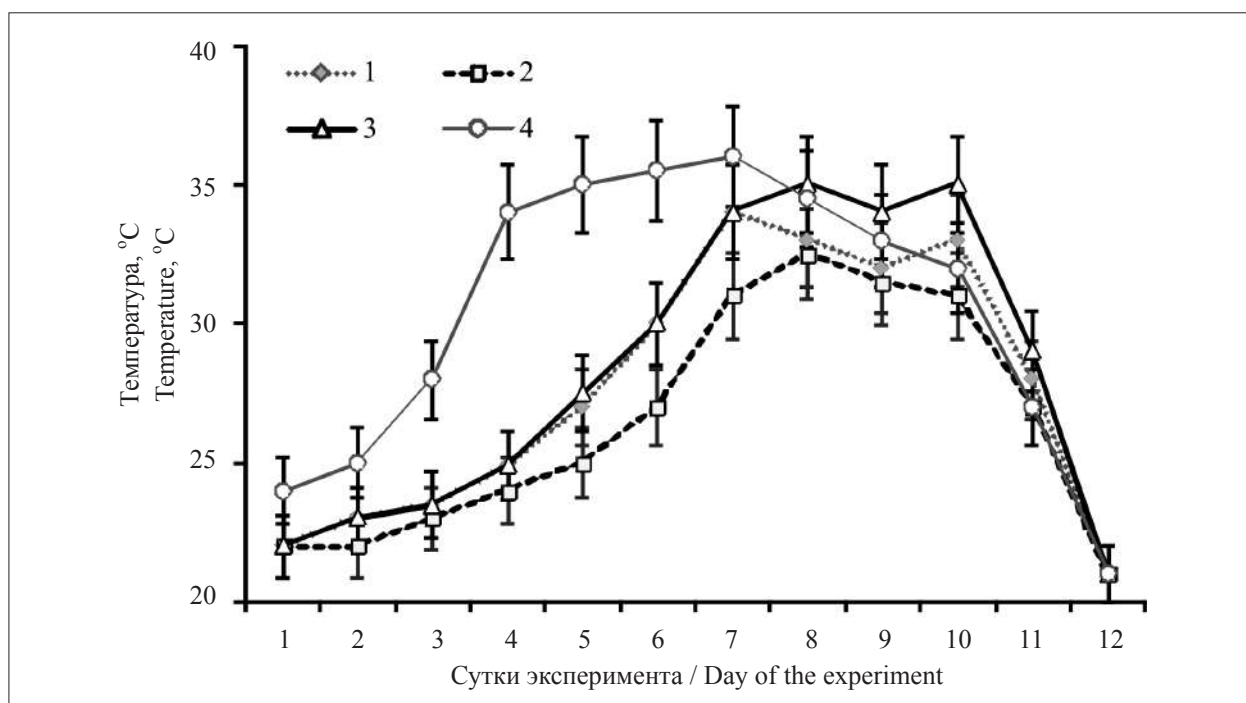


Рис. 1. График динамики температуры субстрата в опыте с развитием в нем личинок *Hermetia illucens*. На картофельном субстрате: 1 – личинки с *Rhabditis* spp., 2 – личинки с *Ditylenchus destructor*, 3 – личинки без нематод. На фруктово-овощной смеси: 4 – личинки без нематод
Fig. 1. Graph of the temperature of the substrate in the experiment with the development of *Hermetia illucens* larvae in it. On potato substrate: 1 – larvae with *Rhabditis* spp., 2 – larvae with *Ditylenchus destructor*, 3 – larvae without nematodes. On fruit and vegetable mix: 4 – larvae without nematodes

Таблица 1 / Table 1

Показатели развития личинок *H. illucens* на разных субстратах
 Indicators of development of larvae of *H. illucens* on different substrates

Вариант Variant	Тип кормового субстрата Type of feed substrate	Из 1 кг сырого субстрата From 1 kg of raw substrate		Конверсия субстрата, % Substrate conversion, %	рН зоокомпоста, единиц pH of zoo compost, units
		сухая биомасса личинок, г dry biomass of larvae, g	сырой зоокомпост*, г crude zoo-compost*, g		
Личинки с <i>Rabditis</i> spp. Larvae with <i>Rabditis</i> spp.	картофельный potato	264,3±7,6	297,1±8,6	70,3±3,6	8,7±0,3
Личинки с <i>D. destructor</i> Larvae with <i>D. destructor</i>		258,6±7,4	305,9±9,4	69,5±2,1	8,5±0,6
Личинки без нематод Larvae without nematodes		249,7±7,2	284,4±7,9	71,6±4,5	8,3±0,4
Личинки без нематод Larvae without nematodes	фруктово-овощная смесь fruit and vegetable mix	267,4±7,7	300,2±8,2	70,6±4,9	6,9±0,6

Примечание: * – влажность зоокомпоста 35,4±4,6%.
 Note: * – zoocompost humidity 35.4±4.6%.

остаточной массы связано с присутствием в субстрате органических фруктовых кислот, нейтрализующих образующийся в результате жизнедеятельности личинок львинки аммиак, который растворяется во влажной среде и защелачивает её. Результаты развития личинок

H. illucens представлены в таблице 1. Опытные варианты картофельной или фруктово-овощной смеси отходов в качестве корма для личинок использовались насекомым в одинаковой степени. Присутствие нематод не повлияло на процесс биоконверсии суб-

Таблица 2 / Table 2

Количество сапробиотических и фитопаразитических нематод в картофельном субстрате на 12-е сутки жизнедеятельности личинок *H. illucens*
The number of saprobiotic and phytoparasitic nematodes in potato substrate on the 12th day of life of *H. illucens* larvae

Вариант Variant	<i>D. destructor</i> , экз./вариант <i>D. destructor</i> , ind./variant		<i>Rabditis</i> spp., экз./вариант <i>Rabditis</i> spp., ind./variant	
	1 сут / 1 day	12 сут / 12 day	1 сут / 1 day	12 сут / 12 day
С личинками <i>H. illucens</i> With larvae <i>H. illucens</i>	0	0	4000	0
С личинками <i>H. illucens</i> With larvae <i>H. illucens</i>	4000	0	0	0
Без личинок <i>H. illucens</i> No larvae <i>H. illucens</i>	3000	400	1000	11000

Таблица 3 / Table 3

Действие зоокомпостов на развитие растений томатов и их заражённость галловой нематодой *Meloidogyne incognita* / The effect of zoocomposts on the development of tomato plants and their infection with the *Meloidogyne incognita*

Вариант обработки Processing option	Масса надземных органов, г Mass of aboveground organs, g <i>m</i>	Длина стебля, см Stem length, cm <i>L</i>	<i>m/L</i>	Число галлов/г корня The number of galls/g root	Размер галлов, мм _x мм Galls size, mm _x mm	Размер самок, мм _x мм Size of females, mm _x mm	Число яиц в оотеке The number of eggs in the eggsuc
ФЗО* + <i>M. incognita</i> , 6,5 г/растение / FVZ* + <i>M. incognita</i> , 6.5 g/plant	13,0±1,3	38,1±3,4	0,362	83±13	2,2±0,1	0,24±0,05	34,0±1,8
ФЗО + <i>M. incognita</i> , 13 г/растение / FVZ + <i>M. incognita</i> , 13 g/plant	7,0±0,9	32,0±2,1	0,219	98±9	1,8±0,1	0,20±0,05	25,0±0,4
ФЗО прогретый + <i>M. incognita</i> , 6,5 г/растение / FVZ heated + <i>M. incognita</i> , 6.5 g/plant	8,0±0,9	32,0±3,6	0,250	105±10	1,7±0,1	0,24±0,06	25,0±0,4
КЗ** + <i>M. incognita</i> , 6,5 г/растение / PZ** + <i>M. incognita</i> , 6.5 g/plant	10,1±0,7	34,0±3,1	0,297	151±11	2,44±0,07	0,24±0,06	63,0±0,7
Контроль заражённый Control infected	4,0±0,1	34,7±3,78	0,115	201±16	3,47±0,09	0,24±0,07	51,0±0,7
Контроль незаражённый Control uninfected	15,2±0,9	54,7±4,4	0,273	–	–	–	–

Примечание: *ФЗО – фруктово-овощной зоокомпост; **КЗ – картофельный зоокомпост; “–” – показатели отсутствуют у здоровых растений.

Note: *FVZ – fruit and vegetable zoocompost; **PZ – potato zoocompost; “–” – indicators are absent in healthy plants.

страта личинками львинки и показатели их биомассы.

Через 12 сут после внесения нематод в картофельный субстрат был проведён анализ жизнеспособности нематод. В вариантах с личинками *H. illucens* и нематодами выявили полное отсутствие в зоокомпосте (переработанном личинками *H. illucens* картофельном субстрате) и фитогельминтов, и сапробиотиче-

ских нематод (табл. 2). В варианте без личинок количество фитогельминта – *D. destructor* существенно сократилось, но было выделено около 400 особей паразитической нематоды, а количество сапробиотических нематод – *Rhabditis* spp. возросло в 11 раз и составило около 11 тыс. личинок и взрослых нематод. Таким образом, фитопатогенные нематоды в субстрате за исследуемый период сохрани-

лись, а сапробиотические нематоды размножились.

Результаты оценки способности зоокомпоста подавлять развитие галловой нематоды *M. incognita*, которой заразили предварительно полученную рассаду томатов, представлены в таблице 3. Инвазирование растений значительно угнетало их развитие. На это указывает существенное снижение биометрических показателей томатов. Так, по средней массе надземных органов растений контрольный вариант значительно отличался от опытных ($p \leq 0,02$): этот показатель снизился почти в 4 раза ($F = 14,79, p \leq 0,001$), а по длине стебля – в 1,58 раза ($F = 14,79, p \leq 0,001$). Внесение зоокомпостов под корневую систему непосредственно перед заражением 2-х месячной рассады томатов снизило негативное воздействие нематоды, растения были мощнее по сравнению с заражённым контролем. Особенно выделялись растения, обработанные фруктово-овощным зоокомпостом в дозе 6,5 г/растение: масса их надземной части и высота стебля приближалась к незаражённому контролю, о чём свидетельствует относительный показатель m/L (соотношение массы надземных органов к длине стебля), составивший 0,362, в то время как у незаражённых растений – 0,273.

Термическая обработка зоокомпоста вызвала некоторое снижение эффекта, также, как и действие фруктово-овощного зоокомпоста в дозе 13 г/растение. Замораживание-оттаивание картофельного зоокомпоста привело к увеличению массы надземных органов томатов, только на 23%, уступающей массе надземных органов при введении в почвогрунт 6,5 г/растение фруктово-овощного зоокомпоста и на 33% меньше незаражённого контроля.

При анализе показателей развития нематоды было выявлено, что все обработки в разной степени влияли на нематоду. По снижению количества галлов были эффективны зоокомпосты в дозе 6,5 и 13 г/растение, число галлов по сравнению с контролем снизилось в 2,4 и 2 раза соответственно. По размеру галлов все опытные варианты достоверно отличались от контроля ($F = 2,98, p \leq 0,02$). Наиболее мелкие галлы образовались на корнях растений при внесении зоокомпоста в дозе 13 г/растение и термически прогретого, их размеры были практически в 2 раза мельче контроля. Кроме того, установлена отрицательная зависимость между размером галлов и весом корня ($r = -0,4, p = 0,02$). Одним из показателей успешности развития нематод являются размеры самок

галловых нематод. Снижение размеров самок наблюдалось при внесении зоокомпоста в дозе 13 г/растение. Эта же обработка и прогретый зоокомпост привели к существенному уменьшению числа яиц в оотеках (в 2 раза) по сравнению с контролем.

Личинки мухи чёрной львинки *H. illucens* способны эффективно использовать в качестве кормового субстрата фруктово-овощные отходы торговых сетей, в том числе, заражённые фитопатогенными или сапробиотическими нематодами. Анализ степени преобразования субстрата личинками чёрной львинки показал, что биоконверсии подверглось около 70% отходов. В случае заражения использованного для эксперимента картофеля фитопаразитическими и сапробиотическими нематодами образованный зоокомпост не содержал нематод. Личинки львинки, по-видимому, способны использовать нематод в качестве дополнительного источника пищи, так как в результате развития личинок на картофельном субстрате с нематодами масса *H. illucens* оказалась больше, чем в картофельном субстрате без нематод: дополнительно получено 3,3% биомассы личинок на субстрате с клубневой нематодой картофеля *D. destructor* и 6,7% на субстрате с *Rhabditis* spp. При этом нематоды отсутствовали. Вероятно, они были уничтожены личинками львинки *H. illucens* за время эксперимента. Способность личинок чёрной львинки элиминировать картофельную и сапробиотические нематоды в поражённом корнеплоде может использоваться для утилизации испорченного при хранении картофеля.

Заражение растений галловой нематодой приводит к угнетению их роста и развития, что отражается на биометрических характеристиках растения: высоте и массе надземных органов. Внесение полученного из фруктово-овощных отходов зоокомпоста в почвогрунт уменьшает патогенное воздействие галловой нематоды *M. incognita*, позволяет приблизить у томатов, выращиваемых на таком же почвогрунте, показатель соотношения веса надземных органов к длине стебля к аналогичному показателю у здоровых растений, развивающихся на не заражённом нематодой почвогрунте. Термическая обработка зоокомпоста не привела к исчезновению эффекта его действия на развитие растений и нематод. Замораживание-размораживание зоокомпоста вызвало некоторое снижение антинематодного эффекта. Возможно, это связано не с температурой хранения компоста, а с

нейтральным значением его кислотности, указывающего на различия в химическом составе компостов, полученных при развитии личинок на разных субстратах.

Заключение

Переработка и последующее использование занимает важнейшее место в «иерархии управления отходами» [13]. Использование личинок мухи чёрной львинки *H. illucens* для биоутилизации твёрдых органических отходов – перспективное направление, позволяющее с одной стороны перерабатывать отходы экологически безопасным способом, а с другой – получать белковый кормовой продукт в виде съедобной биомассы личинок чёрной львинки и биоудобрение в виде зоокомпоста, обладающего ценным свойством защиты растений от фитопатогенов.

Полученный при переработке личинками мухи *H. illucens* органических отходов зоокомпост проявляет оздоровительный эффект при внесении в почву, так как личинки позволяют избавиться её от возможного присутствия фитонематод, в том числе, и от экономически значимых паразитов растений. Поскольку зоокомпост содержит большое количество веществ, необходимых для вегетации растений, его можно использовать в качестве биоудобрения для стимуляции роста и развития растений, особенно, страдающих от нематодной инвазии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект № 075-11-2019-070 и в рамках Госзадания по теме № 0109-2019-0008.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of education and science, project No. 075-11-2019-070 and within the framework of the state Task on the topic No. 0109-2019-0008.

References

1. Ushakova N.A., Bastrakov A.I., Karagodin V.P., Pavlov D.S. Specific features of organic waste bioconversion by *Hermetia illucens* fly larvae (Diptera: Stratiomyidae, Linnaeus, 1758) // *Biology Bulletin Reviews*. 2018. V. 8. P. 533–541. doi: 10.1134/S2079086418060117
2. Kalová M., Borkovcová M. Voracious larvae *Hermetia illucens* and treatment of selected types of biodegradable

waste // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2013. V. LXI. No. 1. P. 77–83. doi: 10.11118/actaun201361010077

3. Wang Y.-S., Shelomi M. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food // *Foods*. 2017. V. 6. No. 10. P. 91. doi: 10.3390/foods6100091

4. Diener S., Studt Solano N., Roa Gutiérrez F., Zurbrügg C., Tockner K. Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae // *Waste Biomass Valorization*. 2011. V. 2. No. 4. P. 357–363. doi: 10.1007/s12649-011-9079-1

5. Zinovieva S.V., Chizhov V.N., Pridannikov M.V., Subbotin S.A., Ryss A.Yu., Husainov R.V. Phytoparasitic nematodes of Russia. Moskva: KMK, 2012. 385 p. (in Russian).

6. Blohin G.I., Aleksandrov V.A. Zoology. Moskva: Kolos, 2006. 510 p. (in Russian).

7. Liu X., Chen X., Wang H., Yang Q., Rehman K., Li W., Cai M., Li Q., Mazza L., Zhang J., Yu Z., Zheng L. Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly // *PLoS ONE* 2017. V. 12. No. 8. P. 1–21. doi: 10.1371/journal.pone.0182601

8. Udalova Zh.V., Udalova V.B., Zinovieva S.V. The use of chitin and chitosan in the fight against parasitic nematodes // *Russian Parasitological Journal*. 2011. No. 3. P. 109–115 (in Russian).

9. Ramadhani E.P., Rachmisanti H., Gede S., Mia R. Application of compost produced by bioconversion of coffee husk by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as solid fertilizer to lettuce (*Lactuca sativavar. crispa*): Impact to harvested biomass and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium // *GreenTech*. 2017. V. 8. No. 1. P. 20–26.

10. Suantika G., Putra R.E., Hutami R., Rosmiati M. Application of compost produced by bioconversion of coffee husk by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as solid fertilizer to lettuce (*Lactuca sativa var. crispa*) // *Proceedings of the International Conference on Green Technology*. 2017. V. 8. No. 1. P. 20–26.

11. Whitehead A.G., Hemming J.R. A comparison of some quantitative methods extracting small vermiform nematodes from the soil // *Annals of Applied Biology*. 1965. V. 55. P. 25–38. doi: 10.1111/j.1744-7348.1965.tb07864.x

12. Zinovieva S.V., Ozeretskovskaya O.L., Iliinskaya L.I., Vasyukova N.I. Biogenic elicitor (arachidonic acid) induced resistance in tomato to *Meloidogyne incognita* // *Russian Journal Nematology*. 1995. V. 3. No. 1. P. 65–67.

13. Gordeeva Y.M. Waste management law and policy: global trends and European Union experience // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 237–241 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-237-241

Micromycetes on polymeric materials under natural conditions of warm humid climate and simulated tropical climate conditions

© 2021. A. A. Krivushina ORCID: 0000-0001-7753-7293

T. V. Bobyreva ORCID: 0000-0002-7588-7166, J. S. Goryashnik ORCID: 0000-0001-9200-4057

T. V. Yakovenko ORCID: 0000-0001-8609-0024, A. B. Laptev ORCID: 0000-0002-6680-1607

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,
17, Radio St., Moscow, Russia, 105005,
e-mail: kopengagen8@mail.ru

Artificial polymer materials represent a specific ecological niche for destructive microorganisms adapted to growth and development at the expense of their components. Microorganisms quickly adapt to a wide range of materials, begin to intensively develop either due to external pollution, or due to the components of the material itself, causing microbiological damage of a different nature. Among the many types of microorganisms, micromycetes play a special role as agents of the biodegradation process. This is especially true under conditions of high humidity and temperature. Tests are carried out under various conditions in order to study the microbiological resistance of functional materials and to isolate new microorganisms-destroyers. During 18 months under natural conditions of warm humid climate and conditions of tropical climate imitation there were exposed samples of polymeric materials: rubbers, sealants, and rubber-fabric materials. 16 strains of mycelial fungi belonging to 14 species of 9 genera were isolated from all studied samples of polymeric materials after exposure. For the first time micromycetes contaminating the polymeric materials were isolated under conditions of tropical climate imitation. 10 strains of micromycetes were isolated, *Penicillium lanosum* and *Cladosporium sphaerospermum* were dominant, *Penicillium* sp., *Cladosporium oxysporum* and *Aspergillus ochraceus* were less common. Under natural conditions of warm humid climate 6 strains of micromycetes were isolated, *Trichoderma viride*, *Aspergillus cervinus* and *Cladosporium oxysporum* species prevailed, *Pestalotiopsis guepinii* species was noted less often. Most of the isolated fungi are known as destructors of polymeric materials in different climatic zones and environmental conditions. Fungi cultures are of interest for testing materials for microbiological resistance, effectiveness of antiseptics and biocidal additives, studying the biological destruction of biodegradable materials, and other research.

Keywords: biodeterioration, biological destruction, microbiological resistance, microbial damage, microorganisms-destroyers, ecological niche.

УДК 582.284.51+52 (571.51)

Микромицеты на полимерных материалах в естественных условиях тёплого влажного климата и имитационных условиях тропического климата

© 2021. А. А. Кривушина, к. б. н., с. н. с., Т. В. Бобырева, инженер,
Ю. С. Горяшник, ведущий инженер, Т. В. Яковенко, инженер,
А. Б. Лаптев, д. т. н., г. н. с.,

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 17,
e-mail: kopengagen8@mail.ru

Полимерные материалы, создаваемые человеком, представляют собой специфическую экологическую нишу для микроорганизмов-деструкторов, которые приспособились к росту и развитию за счёт их компонентов. Особенно это актуально в условиях повышенной влажности и температуры. В данном исследовании в течение 18 месяцев в естественных условиях тёплого влажного климата и условиях имитации тропического климата проходили испытания на микробиологическую стойкость образцы полимерных материалов: резины, герметики и резинотканевые материалы. Со всех исследуемых образцов полимерных материалов после экспозиции было выделено 16 штаммов мицелиальных грибов, относящихся к 14 видам 9 родов. Впервые были выделены 10 штаммов микромицетов, кон-

таминирующих полимерные материалы в условиях имитации тропического климата, среди которых доминировали виды *Penicillium lanosum* и *Cladosporium sphaerospermum*, реже встречаются *Penicillium* sp., *Cladosporium oxysporum* и *Aspergillus ochraceus*. В естественных условиях тёплого влажного климата выделено 6 штаммов микромицетов, преобладали виды *Trichoderma viride*, *Aspergillus cervinus* и *Cladosporium oxysporum*, реже отмечен вид *Pestalotiopsis guerinii*. Большинство выделенных грибов известны как деструкторы полимерных материалов в различных климатических зонах и экологических условиях и представляют интерес для испытаний материалов на грибостойкость, изучения биологической деструкции биоразлагаемых материалов и других исследований.

Ключевые слова: биоповреждения, биологическая деструкция, микробиологическая стойкость, микробиологические повреждения, микроорганизмы-деструкторы, экологическая ниша.

In the course of climate change and increasing anthropogenic load, artificial polymer materials have become a specific ecological niche for microorganisms-destroyers, which have adapted to the growth and development due to their components. Microorganisms quickly adapt to a wide range of materials, begin to develop intensively either due to external contamination or due to the components of the material itself, causing biodeterioration. Among many types of microorganisms, micromycetes or mycelial fungi play a special role as agents of the biodegradation process on materials of different chemical nature and structure [1–3].

The composition of the micromycetes census on the surface of the material is determined not only by its chemical nature, but also by a set of external factors, such as operating and storage conditions of the material, as well as temperature and humidity conditions. Therefore, the effect of micromycetes on various materials in a humid tropical climate is particularly significant. Under these conditions the rapid growth and accumulation of biomass occurs, which is facilitated by high rates of temperature, humidity, and other external factors. In addition, in these climatic and geographical conditions, the highest level of biodiversity in the world, including microbiological communities, was noted, which significantly increases the likelihood of new destroyers and, accordingly, the occurrence of microbiological lesions of materials that are operated in this zone. Russia does not have its own territory with a humid tropical climate, but there are areas of humid warm climate, for example, the Sochi region. Thus, there were prerequisites for comparative tests of materials' microbiological resistance and the release of microorganisms under the natural conditions of warm humid climate, as well as in the simulation of humid tropical climate. As optimal conditions for the latter were selected Tropical block in the New greenhouse of Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences. The climate of this greenhouse, equipped with modern electronic control systems, is as close as possible to

the conditions of a humid tropical climate. In the Tropical block of the New greenhouse, about 550 species of woody and herbaceous plants from all regions of the globe with a tropical climate are planted in the ground [4].

The aim of this work was to identify strains of micromycetes from samples of various polymeric materials exposed under natural conditions of warm humid climate and tropical climate simulation.

Objects and Methods

Samples of the following polymeric materials were used for exposure under various conditions: rubber-fabric material used for the manufacture of a soft fuel tank, a rubber mixture based on butyl-nitrile rubber of medium viscosity, a rubber mixture based on butyl-nitrile rubber of low viscosity, thiocol sealant vulcanized with manganese salts. The samples were exposed for 18 months in mycological stands in the Yew-boxwood grove near the city of Sochi and in the New greenhouse of Tsitsin Main Botanical Garden in Moscow. During testing at both mycological sites, temperature and humidity conditions were monitored. After the end of the exposition, the samples were placed in sterile containers and transported to the laboratory, where micromycetes were isolated from their surface.

Standard methods were used for isolation of micromycetes from the samples of polymeric materials. These include prints and direct sowing on a nutrient Czapek medium and malt agar. Inspection of samples and photos were taken on the Leica M165FC stereomicroscope. The frequency of occurrence of strains is calculated as the ratio of Petri dishes number in which the strain is encountered to the total number of Petri dishes on which the isolation was carried out.

Results and Discussion

The species composition of the selected micromycetes and their occurrence on the samples of materials are presented in tables 1 and 2. On all

Table 1

Species composition of isolated micromycetes and their incidence on samples of materials after exposure to natural conditions of a warm humid climate (Sochi region)

Isolated species of micromycetes	Material				Incidence of micromycetes by materials
	rubber-fabric material	medium viscosity rubber compound	low viscosity rubber compound	thiokol sealant	
<i>Aspergillus cervinus</i> Masee	–	+	–	+	2
<i>Cladosporium oxysporum</i> Berk. & M.A. Curtis	+	–	+	–	2
<i>Mucor plumbeus</i> Bonord.	+	–	–	–	1
<i>Penicillium rugulosum</i> Thom	–	–	–	+	1
<i>Pestalotiopsis guepinii</i> (Desm.) Steyaert	+	–	–	–	1
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	+	–	–	+	2
Species diversity of isolated micromycetes	4	1	1	3	–

Table 2

Species composition of isolated micromycetes and their incidence on samples of materials after exposure to imitation conditions of tropical climate (Greenhouse, Moscow)

Isolated species of micromycetes	Material				Incidence of micromycetes by materials
	rubber-fabric material	medium viscosity rubber compound	low viscosity rubber compound	thiokol sealant	
<i>Acremonium</i> sp.	–	–	+	–	1
<i>Aspergillus ochraceus</i> G. Wilh.	+	+	–	–	2
<i>Aspergillus terreus</i> Thom	–	+	–	+	2
<i>Cladosporium oxysporum</i> Berk. & M.A. Curtis	+	–	–	–	1
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.	–	+	+	+	3
<i>Penicillium lanosum</i> Westling	+	+	+	–	3
<i>Penicillium</i> sp.	+	–	–	–	1
<i>Rhizopus oryzae</i> Went & Prins. Geerl	+	+	–	–	2
<i>Stachybotrys chartarum</i> (Ehrenb.) S. Hughes	+	–	–	–	1
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	+	–	–	–	1
Species diversity of isolated micromycetes	7	5	3	2	–

studied samples of materials after the exposure the fungi growth of varying degrees was observed. The most susceptible to microbiological damage were samples of rubber-fabric material, on the surface of the samples the formation of fungal mycelium was observed with the naked eye, and when viewed under a microscope, a well-developed sporulation was found (Fig. 1). In addition, the samples of rubber-fabric material showed the greatest species diversity of micromycetes. Samples of rubber compounds

and thiokol sealant were also affected by micromycetes (Fig. 1, 2, see color tab).

For all selected species, the total frequency of occurrence (percentage) was calculated as presented in Figures 3 and 4.

As can be seen from the diagrams, the most common species *Trichoderma viride*, *Aspergillus cervinus* and *Cladosporium oxysporum* are found on material samples after exposure under natural conditions. *Trichoderma viride* is often isolated from samples of non-metallic materi-

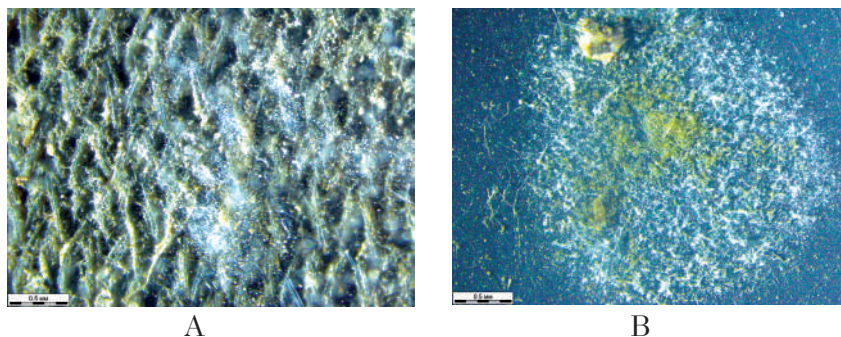


Fig. 1. Growth of micromycetes on the surface of samples of rubber-fabric material (A) and medium viscosity rubber (B)

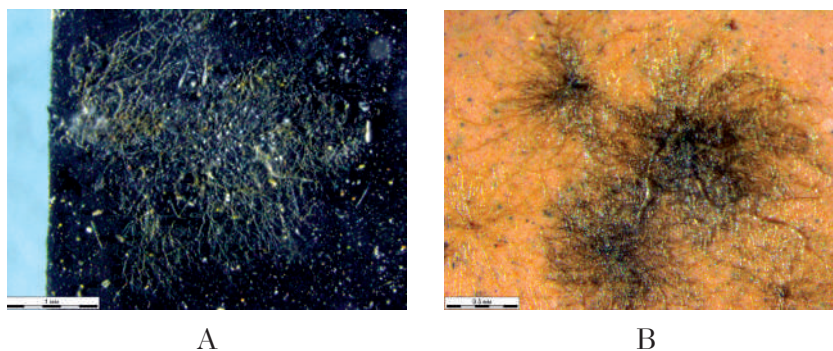


Fig. 2. Growth of micromycetes on the surface of samples of low viscosity rubber compound (A) and thiokol sealant (B)

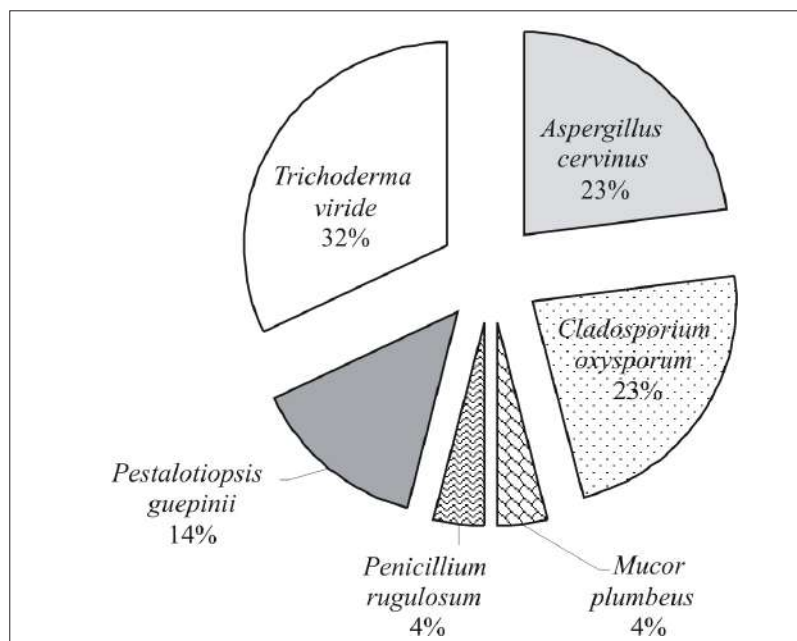


Fig. 3. The frequency of occurrence of micromycete species isolated from samples of materials after exposure to natural conditions

als in different zones from works of art and books in storage. It is noted its ability to grow due to the components of polymeric materials [5–8]. In addition, the species of *Trichoderma viride* is a part of the test cultures used by many standards for testing materials and products for fungal resistance, including GOST 9.048, GOST 9.049, etc. Micromycetes of the genera *Penicillium*, *Cladosporium* and *Aspergillus* are the most common fungi among micromycetes destructors. They are often isolated from various materials and structures that have undergone biodeterioration: from the surface of buildings, building materials, works of art, books and documents in book depositories, etc. [5–12]. Micromycetes of these genera are also isolated from metal materials, in particular, from the structural surfaces of spacecraft, their activity as biocorrosion agents is shown [13]. Species of these genera are part of the test cultures according to Russian and foreign standards for testing the fungal resistance of materials and products.

Pestalotiopsis guepinii is found a little less often. Species of the genus *Pestalotiopsis* is often isolated from various substrates in areas with warm humid climate, among them there are also destructors. So, for instance, the species *Pestalotiopsis microspora* has a set of enzymes that can destroy plastic. *Pestalotiopsis* sp. strains decompose hydrocarbons of oil [14, 15]. The lowest frequency of occurrence was noted for two species of fungi: *Mucor plumbeus* and *Penicillium rugulosum*. According to the literature, these

species are often found on samples of polymeric materials under various environmental conditions [5, 8, 11, 12].

Among the fungi isolated from the materials after exposure in a greenhouse, the frequency of occurrence was dominated by species *Penicillium lanosum* and *Cladosporium sphaerospermum*. Species *P. lanosum* is isolated from samples of rubber of both brands and rubber-fabric material and noted in the literature as a destructor of polymeric materials of different chemical composition. *C. sphaerospermum* is isolated from both rubber and sealant grades and is also known for its destructive activity. Less often, but nevertheless repeatedly, three species were encountered: *Penicillium* sp., *Cladosporium oxysporum*, and *Aspergillus ochraceus*. Species of fungi *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus terreus*, *Acremonium* sp., *Stachybotrys chartarum* are met almost sporadic. It is known that the species *Aspergillus terreus* often settles on the surface of polymeric materials in warehouses. Isolated strains of this species can actively destroy cellulose. Species of the genus *Rhizopus* and *Acremonium* often contaminate the surface of polymeric materials, but their role in the destruction of materials has not been studied enough. Fungi of species *Stachybotrys chartarum* are also often isolated from samples of non-metallic materials in different zones, its ability to grow due to the components of polymeric materials is noted [5, 16].

Micromycetes, which contaminate the surface of samples and can be potential destructors,

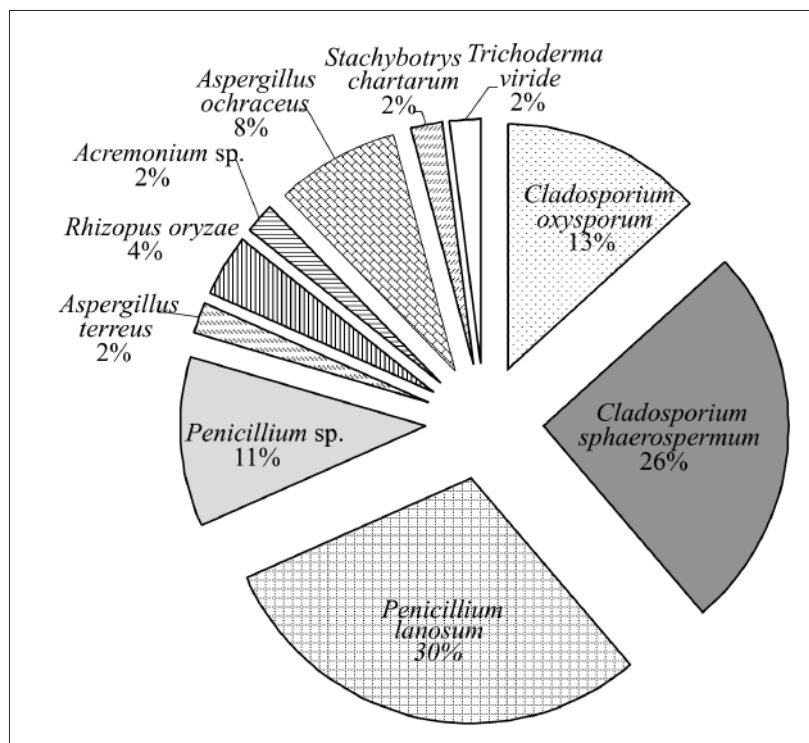


Fig. 4. The frequency of occurrence of micromycetes species isolated from samples of materials after exposure to greenhouse conditions

in nature are inhabitants of soil, plants, litter and other natural substrates. In the greenhouse, the species composition of microorganisms will be influenced by a number of factors, such as the type of soil used, plant species, the composition of mineral fertilizers, biocides used, irrigation regime, and many other factors. According to the results of this study, the species list of micromycetes isolated from the materials in the greenhouse is not inferior to the number of species isolated in the natural conditions of warm humid climate, so further study of the biodiversity of microorganisms that contaminate materials under simulation conditions is of great interest. From a practical point of view, the results of our study allow us to speak about the effectiveness of specific tests of materials for microbiological resistance, since most of the samples of non-metallic materials were subjected to biodeterioration.

Conclusion

Thus, after 18 months of exposure of polymeric materials under natural conditions of warm humid climate and conditions of tropical climate imitation, a total of 16 mycelial fungi strains belonging to 14 species of 9 genera were isolated. There were first isolated micromycetes, contaminated polymeric materials under

conditions simulating a tropical climate. These include 10 strains of micromycetes, among which *Penicillium lanosum* and *Cladosporium sphaerospermum* species were dominant, less common were *Penicillium sp.*, *Cladosporium oxysporum*, and *Aspergillus ochraceus*. Under natural conditions of warm humid climate 6 strains of micromycetes were isolated; *Trichoderma viride*, *Aspergillus cervinus*, and *Cladosporium oxysporum* species prevailed, *Pestalotiopsis guepinii* species was less abundant. Most of the isolated fungi are known as destructors of materials and products in various climatic zones and environmental conditions.

All the obtained cultures of micromycetes are deposited in the collection of microorganisms of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials and will be used for testing the fungal resistance of materials, testing the effect of protective agents and other studies. In addition, these cultures are of interest not only from the point of view of studying the biodiversity of micromycetes inhabiting various polymeric materials, but also from the point of view of material protection and for their use as agents of biological destruction of the materials used.

Funding: the study was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 18-29-05033).

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE "VIAM" SSC of the Russian Federation on implementation of "Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030" // *Aviacionnye materialy i tehnologii*. 2015. No. 1 (34). P. 3–33 (in Russian).
2. Polyakova A.V., Krivushina A.A., Goryashnik Y.S., Boucharev G.M. Tests for microbiological resistance in natural conditions of different climatic zones // *Trudy VIAM*. 2016. No. 4. P. 12 (in Russian). doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-11-11
3. Krivushina A.A., Goryashnik Y.S. Methods of protection of materials and products from microbiological damage (review) // *Aviacionnye materialy i tehnologii*. 2017. No. 2 (47). P. 80–86 (in Russian). doi: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86
4. Romanov M.S., Zolkin S.Y., Kolomeytseva G.L. The history and dynamics of acquisition of the stock greenhouse of the Main Botanical garden named N.V. Tsitsin of the RAS // *Byulleten Glavnogo botanicheskogo sada. Nauchtehlitizdat*. 2015. No. 2 (201). P. 23–36 (in Russian).
5. Lugauskas A.Y., Mikulskene A.I., Shlyauzhene D.Y. Catalog of micromycetes – biodestructors of polymeric materials. Moskva: Nauka, 1987. 344 p. (in Russian).
6. Chen Y., Huang J., Li Y., Zeng G., Huang A., Zhang J., Ma S., Tan X., Xu W., Zhou W. Study of the rice straw biodegradation in mixed culture of *Trichoderma viride* and *Aspergillus niger* BY GC-MS AND FTIR // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. No. 13. P. 9807–9815. doi: 10.1007/s11356-015-4449-8
7. Lugauskas A., Prosychevas I., Levinskaite L., Jaskelevicius B. Physical and chemical aspects of long-term biodeterioration of some polymers and composites // *Environmental Toxicology*. 2004. V. 19. No. 4. P. 318–328. doi: 10.1002/tox.20028
8. Allsopp D., Seal K.J., Gaylarde C.G. Introduction to Biodeterioration. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004. 87 p.
9. Guimet P., Borrego S., Lavin P., Perdomo I., de Saravia S.G. Biofouling and biodeterioration in materials stored at the Historical Archive of the Museum of La Plata, Argentine and at the National Archive of the Republic of Cuba // *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*. 2011. V. 85. No. 2. P. 229–234. doi: 10.1016/j.colsurfb.2011.02.031
10. Zhang J., Han Z., Teng B., Chen W. Biodeterioration process of chromium tanned leather with *Penicillium* sp. // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2017. V. 116. P. 104–111. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.10.019
11. Falkiewicz-Dulik M., Janda K., Wypych G. Handbook of Material Biodegradation, Biodeterioration, and Biostabilization. 2nd Edition, Toronto: ChemTec Publishing, 2015. 474 p.
12. Sabev H.A., Barratt S.R., Greenhalgh M., Handley P.S., Robson G.D. Biodegradation and biodeterioration of man-made polymeric materials // *Fungi in biogeochemical cycles*. UK: Cambridge University Press, 2006. P. 212–235. doi: 10.1017/CBO9780511550522.010
13. Plotnikov A.D., Alehova T.A., Zagustina N.A., Aleksandrova A.V., Novoghilova T.Y. New approaches (3D microscopy) to the comparative assessment of biocorrosive damages of aircraft aluminum-magnesium alloys // *Sovremennaya mikologiya v Rossii*. V. 6. Tezisy докладov IV Syezda mikologov Rossii. Moskva: Natsionalnaya akademiya mikologii, 2017. P. 422–424 (in Russian).
14. Russell J.R., Huang J., Anand P., Kucera K., Sandoval A.G., Dantzler K.W., Hickman D., Kimovec F. M., Koppstein D., Marks D.H., Mittermiller P.A., Núñez S.J., Santiago M., Townes M.A., Vishnevetsky M., Williams N.E., Vargas M.P., Boulanger L.A., Bascom-Slack C., Strobel S.A. Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. V. 77. No. 17. P. 6076–6084. doi: 10.1128/AEM.00521-11
15. Yanto D.H.Y., Tachibana S. Biodegradation of petroleum Hydrocarbons by a newly isolated *Pestalotiopsis* sp. // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2013. V. 85. P. 438–450. doi: 10.1016/j.ibiod.2013.09.008
16. Awasthi S., Srivastava N., Singh T., Tiwary D., Mishra P.K. Biodegradation of thermally treated low density polyethylene by fungus *Rhizopus oryzae* NS5 // *3 Biotech*. 2017. V. 7 (1). Article No. 73. doi: 10.1007/s13205-017-0699-4

Экологические и субстратные характеристики эпилитной группы лишайников в условиях Северо-Запада России

© 2021. А. В. Сони́на, д. б. н., доцент, зав. кафедрой,
Петрозаводский государственный университет,
185910, Россия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33,
e-mail: angella_sonina@mail.ru

В данной работе обобщены результаты 20-летних исследований видового состава и структуры эпилитного лишайникового покрова в прибрежных и лесных экосистемах на Северо-Западе России (Мурманская, Архангельская области и Республика Карелия). Лишайниковый покров формируется в различающихся экологических условиях на кварцсодержащих породах отличного химического состава: на гранитах (кислые породы), шунгитах (углеродсодержащие кислые породы), базальтах (породы основного состава), долеритах (ультраосновные породы). По результатам многофакторного анализа ведущим фактором в формировании эпилитного покрова в условиях и морских, и пресноводных побережий является динамика водоёма (величина нагрузки на фактор «удалённость от линии уреза воды» – 0,95–0,86) она определяет и структуру каменистого субстрата, который также играет важную роль для эпилитного покрова (нагрузка на фактор «структура субстрата» – 0,96–0,56). По мере удаления от линии уреза воды число видов лишайников и среднее общее проективное покрытие в описании на учётной площадке значимо возрастает ($p < 0,05$). В лесных экосистемах для эпилитных лишайников лимитирующим выступает световой фактор, который зависит от экспозиции поверхности, угла наклона и микротопографических характеристик субстрата (сколы, зернистость, депрессии), а также от типа растительного сообщества, формирующего макроусловия для лишайникового покрова. Установлено, что в исследованных экосистемах на данных типах субстратов формирование лишайникового покрова зависит от комплекса абиотических и биотических факторов, не выявлено строгой приуроченности видов лишайников к химическому составу субстратов.

Ключевые слова: эпилитные лишайники, прибрежные экосистемы, скальные лесные экосистемы, кварцсодержащие породы, Северо-Запад России.

Ecological and substrate characteristics of epilithic group of lichens in the conditions of the North-West of Russia

© 2021. A. V. Sonina ^{ORCID: 0000-0002-9806-1252}
Petrozavodsk State University,
33, Prospekt Lenina, Petrozavodsk, Russia, 195910,
e-mail: angella_sonina@mail.ru

The aim of this work is to study the environmental and substrate features of the formation of epilithic lichen cover on quartz-bearing rocks of different chemical composition: on granites (acidic rocks), shungites (carbon-containing acidic rocks), basalts (basic rocks), dolerites (ultrabasic rocks) in rocky forest communities and coastal ecosystems of the North-West of Russia. This paper summarizes the results of 20-year study of species composition and structure of epilithic lichen cover in these ecosystems within the Murmansk region, the Arkhangelsk region and the Republic of Karelia. Geobotanical, floristic approaches were used as field methods. Data processing was done by one-way regression analysis and multivariate methods using MS Excel.

In the conditions of sea coasts and fresh water shore zones epilithic lichen cover is formed between the water line and the vegetation of the indigenous seashore. The leading factors in the formation of the epilithic lichen cover are the dynamics of the water body (according of multivariate analysis, the greatest load on the parameter “distance from the water line” – 0.95–0.86) as well as the structure of the rocky substrate (load on this factor is 0.96–0.56). From the water line, the number of lichen species and the average total projective cover on the plots increase significantly ($p < 0.05$). In forest ecosystems, the limiting factor for epilithic lichens is the light intensity. The light intensity depends on the surface exposure, the angle of inclination, and the microtopographic characteristics of the substrate (chips, graininess, depression), as well as on the type of plant community that forms the macroconditions for lichen cover. The pattern of light distribution on the surface of the substrate depending on its angle of inclination ($r^2 = 0.4–0.8$; $p \leq 0.05$) is shown.

It was found that in the studied ecosystems on these types of substrates the formation of lichen cover depends on a complex of abiotic and biotic factors. Within the group of investigated substrates, no strong species relations to the chemical parameters of the substrates were revealed.

Keywords: epilithic lichens, coastal ecosystems, rocky forest ecosystems, quartz-bearing rocks, North-West of Russia.

Изучение экологии эпилитной группы лишайников тесно связано с изучением системы «лишайник-субстрат». Большая значимость в организации лишайниковых сообществ различных факторов внешней среды: высоты над уровнем моря, экспозиции и крутизны склона, структуры и химических особенностей субстрата, отмечена в целой серии исследований, выполненных в различных климатических зонах [1–10]. Наиболее спорным является вопрос строгой приуроченности видов лишайников к химическому составу субстрата.

Анализ литературы по данному вопросу и собственные наблюдения позволили нам сформулировать гипотезу: в системе «лишайник-субстрат» химическая основа породы может влиять на формирование лишайникового покрова в начальный момент выветривания породы. По мере освоения биотой субстрата значимое влияние оказывают факторы абиотической, биотической среды и структура субстрата.

Цель настоящего исследования – изучение экологических и субстратных особенностей формирования эпилитного лишайникового покрова на кварцсодержащих породах в скальных типах лесных сообществ и прибрежных экосистемах на территории Северо-Запада России.

Материалы и методы исследования

Лишайниковый покров был изучен в пределах кварцсодержащих пород отличающегося химического состава: на гранитах (кислые породы, 65% SiO₂), шунгитах (углеродсодержащие породы, 20–55% C), породы кислого состава, 35–75% SiO₂), базальтах (породы основного состава, 45–53% SiO₂), долеритах (ультраосновные породы, < 45% SiO₂), на территории Мурманской области (побережье Баренцева моря, окрестности пос. Дальние Зеленцы), Республики Карелия (Петрозаводский городской округ, Лахденпохский, Кондопожский, Медвежьегорский, Беломорский, Лоухский районы) и Архангельской области (кряж Ветренный пояс, Онежский район).

Лишайниковый покров изучали геоботаническими и флористическими методами.

Параметры абиотической и биотической среды оценивали в условиях лесных фитоценозов на геоботанических профилях (20 × 120–220 м), геоботанических пробных площадях (20 × 20 м) [11, 12], на побережьях использовали трансекты для учёта градиента условий. Лишайниковый покров описывали в пределах учётных площадок (рамка 10 × 20 см), на которых отмечали видовое разнообразие лишайников, покрытие отдельных видов, экспозицию к сторонам света, угол наклона (горным компасом), освещённость (портативным люксметром при облачном небе), тип субстрата, его микротопографию (степень зернистости породы, наличие сколов, трещин – в баллах от 1 до 6). Статистическая обработка выполнена на основе однофакторного регрессионного анализа и многофакторной статистики [13] в программах Excel и StatGraphics.

Результаты и обсуждение

На основании анализа всех полученных данных по прибрежным экосистемам (морским, озёрным, речным) нами установлено, что в зависимости от расположения эпилитного лишайникового покрова на побережье, его формирование контролируется либо условиями водоёма (у уреза воды), либо условиями почвенно-растительного комплекса коренного берега. От взаимного влияния этих двух факторов будет зависеть структура лишайникового покрова, на основании чего нами выделены 4 лишайниковые зоны [12, 14]. У уреза воды на формирование эпилитного лишайникового покрова значимое влияние оказывает водоём, по результатам многофакторного анализа, наибольшая нагрузка приходится на параметр «удалённость от линии уреза воды» (0,95–0,86). По мере удаления от линии уреза воды влияние водоёма ослабевает, и на лишайниковый покров оказывают значимое влияние характеристики субстрата, такие как микротопография (величина нагрузки на это фактор 0,96–0,56) при продвижении к растительным сообществам коренного берега увеличивается роль других абиотических факторов: освещённости, влажности, которые связаны с углом наклона, экспозицией субстрата к сторонам света (рис. 1).

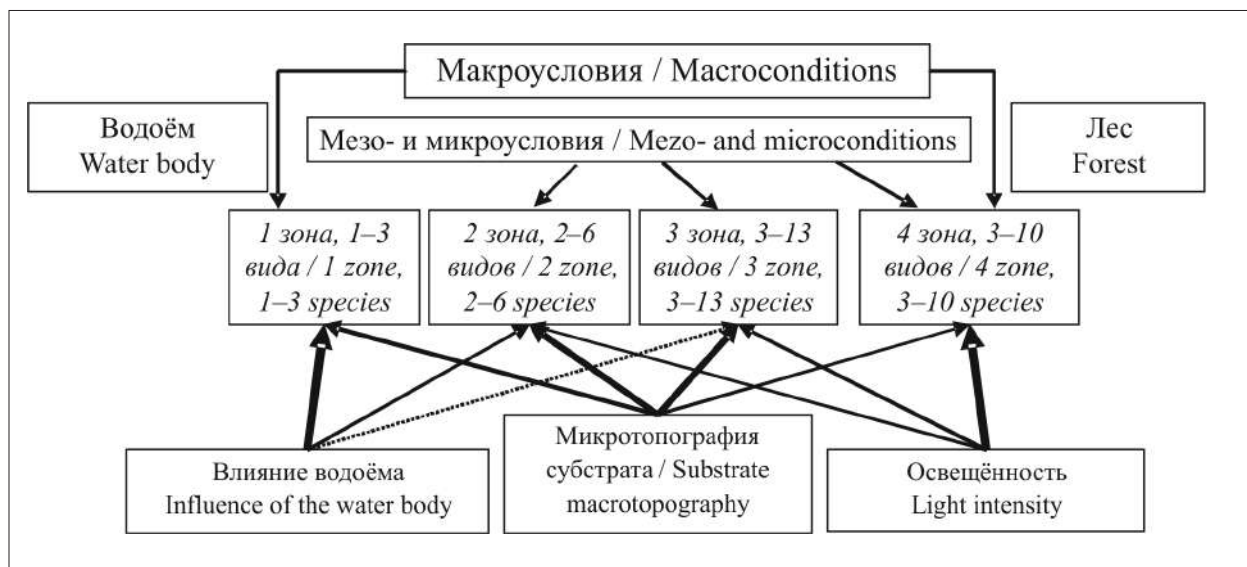


Рис. 1. Влияние факторов среды на распределение лишайниковых зон (толстая линия – $p \leq 0,001$, линия средней толщины – $p \leq 0,01$, пунктир – $p \leq 0,05$)
Fig. 1. The influence of environmental factors on the distribution of lichen zones (bold line – $p \leq 0.001$, line of middle bold – $p \leq 0.01$, dotted line – $p \leq 0.05$)

Распределение видов лишайников по побережьям, несмотря на разный химический состав субстратов, также связано с этой закономерностью. На примере сравнительного анализа видового состава прибрежных лишайнофлор Белого и Баренцева морей с использованием коэффициента Жаккара (K_j) показано высокое сходство лишайнофлор в 1 лишайниковой зоне – у линии уреза воды ($K_j = 0,7$), где обитают галофиты, по мере удаления от линии уреза воды видовое разнообразие меняется в связи с большим влиянием зональных климатических факторов и зональной растительности ($K_j = 0,2-0,4$). Эта же закономерность отмечена и для пресных водоёмов, что позволило нам сделать вывод: лишайниковый покров побережий в первой лишайниковой зоне можно отнести к аazonальному типу лишайнофлоры.

В ходе полевых исследований в скальных лесных сообществах (Петрозаводский городской округ, Ботанический сад ПетрГУ и возвышенности Муройгора и Оловгора Ветреного пояса) нами было отмечено, что на поверхностях камней с разным углом наклона обнаруживаются различия в видовом составе лишайников и в состоянии лишайникового покрова [11, 12, 14]. Для анализа экотопической приуроченности лишайников в качестве факторов среды отмечали освещённость и угол наклона поверхности субстрата. Анализ параметров среды показал, что угол наклона скальной поверхности, который отражает как

количество приходящей радиации, так и условия влажности, и измеренная относительная освещённость значимо связаны ($r^2 = 0,4-0,8$; $p \leq 0,05$). Отрицательно наклонённые поверхности (острые углы, положение лишайникового покрова под камнем) получают мало света, уровень освещённости повышается с увеличением угла по направлению к 0° , т. е. к вертикальной поверхности (рис. 2А). Приход света продолжает увеличиваться от вертикальных к горизонтальным положительно наклонённым поверхностям (рис. 2В). И эта закономерность сохраняется во всех исследованных районах, несмотря на разнообразие сообществ и разницу в химии субстрата (базальты Ботанического сада – основные, долериты Ветреного пояса – ультраосновные).

Таким образом, в зависимости от освещённости выделяются три типа экотопов: I тип – горизонтальные отрицательно наклонённые поверхности, II тип – вертикальные, III тип – горизонтальные положительно наклонённые поверхности. Выделенные экотопы отличаются углом наклона скальной поверхности, перераспределением основных факторов абиотической среды (освещённости и влажности), видовым составом и количественными характеристиками лишайникового покрова.

Для эпилитного лишайникового покрова в лесных сообществах выявлена общая тенденция в формировании: с изменением угла наклона от отрицательных значений к положительным, то есть с выходом из условий

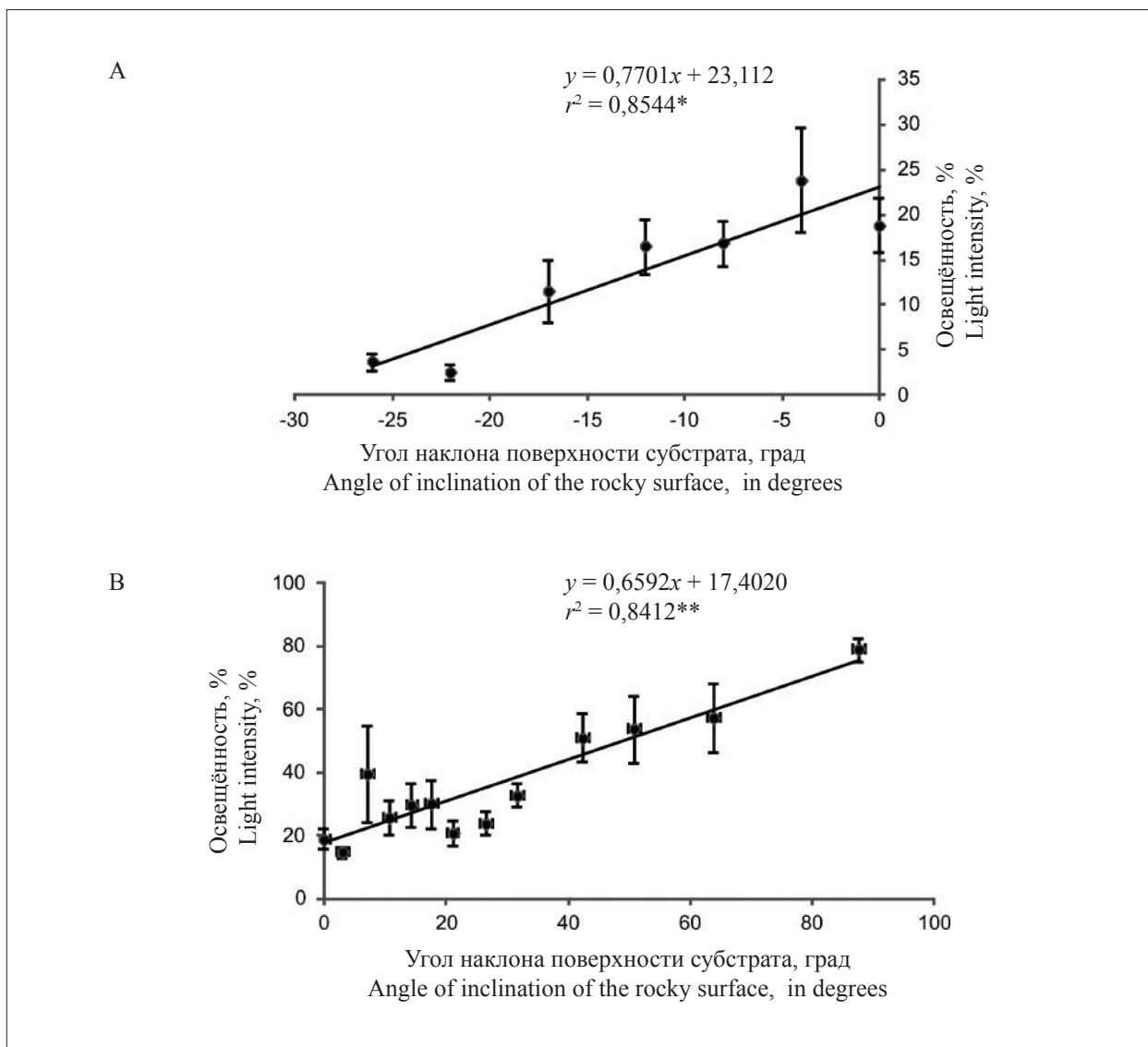


Рис. 2. Относительная освещённость местообитания в зависимости от угла наклона скальной поверхности (Ветренный пояс): А – отрицательно наклонённые поверхности; В – положительно наклонённые поверхности; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Fig. 2. Relative light intensity of the habitat depending from the angle of inclination of the rocky surface (Vetreniy Poyas, literally Windy Belt in Russian): А – negatively inclined surfaces; В – positively inclined surfaces; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

«под камнем» на вертикальные поверхности общие характеристик лишайникового покрова (общее среднее покрытие и число видов в описании) значительно возрастают (рис. 3). Первый тип экотопа представляет собой поверхность, расположенную под камнем (угол -10 – -65°), здесь складываются специфические условия: недостаток света, повышенная влажность (под камнями дольше задерживается снег, лёд), температуры ниже, чем на открытых освещённых участках.

В данных условиях обитают в среднем не более 6 видов лишайников, это сциофиты – не требовательные к условиям освещённости,

такие как *Lepraria cf. incana* (L.) Ach., *L. bo-realis* Lohtander & Tønsberg. с лепрозными талломами, *Cystocoleus ebeneus* (Dillwyn) Thwaites – карликово-кустистый вид, либо семигелиофиты, имеющие широкие экологические возможности по отношению к световому фактору, например, *Lepraria neglecta* (Nyl.) Lettau – вид, для которого в литературе отмечено предпочтение освещённых местообитаний [15], *Rhizocarpon hochstetteri* (Körb.) с накипным талломом и Vain. *Arcthoparmelia centrifuga* (L.) Hale – листоватый вид. Эти виды чаще формируют одновидовые скопления: на камнях образуются хорошо заметные пятна

серого (если пятно сформировано видами рода *Lepraria*), ярко-жёлтого (*Psilolechia lucida* (Ach.) M. Choisy) или чёрного (*Cystocoleus ebeneus*) аспектов. Общее покрытие видов на учётной площадке может составлять от 10 до 60%.

При переходе от отрицательно наклонённых поверхностей к вертикальным (второй тип экотопа) и положительно наклонённым (третий тип экотопа) в покрове ещё доминируют *Lepraria neglecta* и *Arcthoparmelia centrifuga*, что указывает на их светолюбие и широкую экологическую амплитуду к условиям освещённости. В зависимости от микроусловий

на таких поверхностях доминантами выступают накипные виды ризокарпонов, или порпидий, или листоватые, такие как *Parmelia omphalodes* (L.) Ach., *P. saxatilis*. Лишайниковые синузии становятся многовидовыми, куда включается большее число видов листоватых жизненных форм. Это указывает на последовательную сукцессионную смену в развитии эпилитного лишайникового покрова в ненарушенных сообществах. С увеличением угла наклона поверхности, при переходе от вертикальных поверхностей к горизонтальным положительным, число видов лишайников в описании и общее покрытие в среднем не

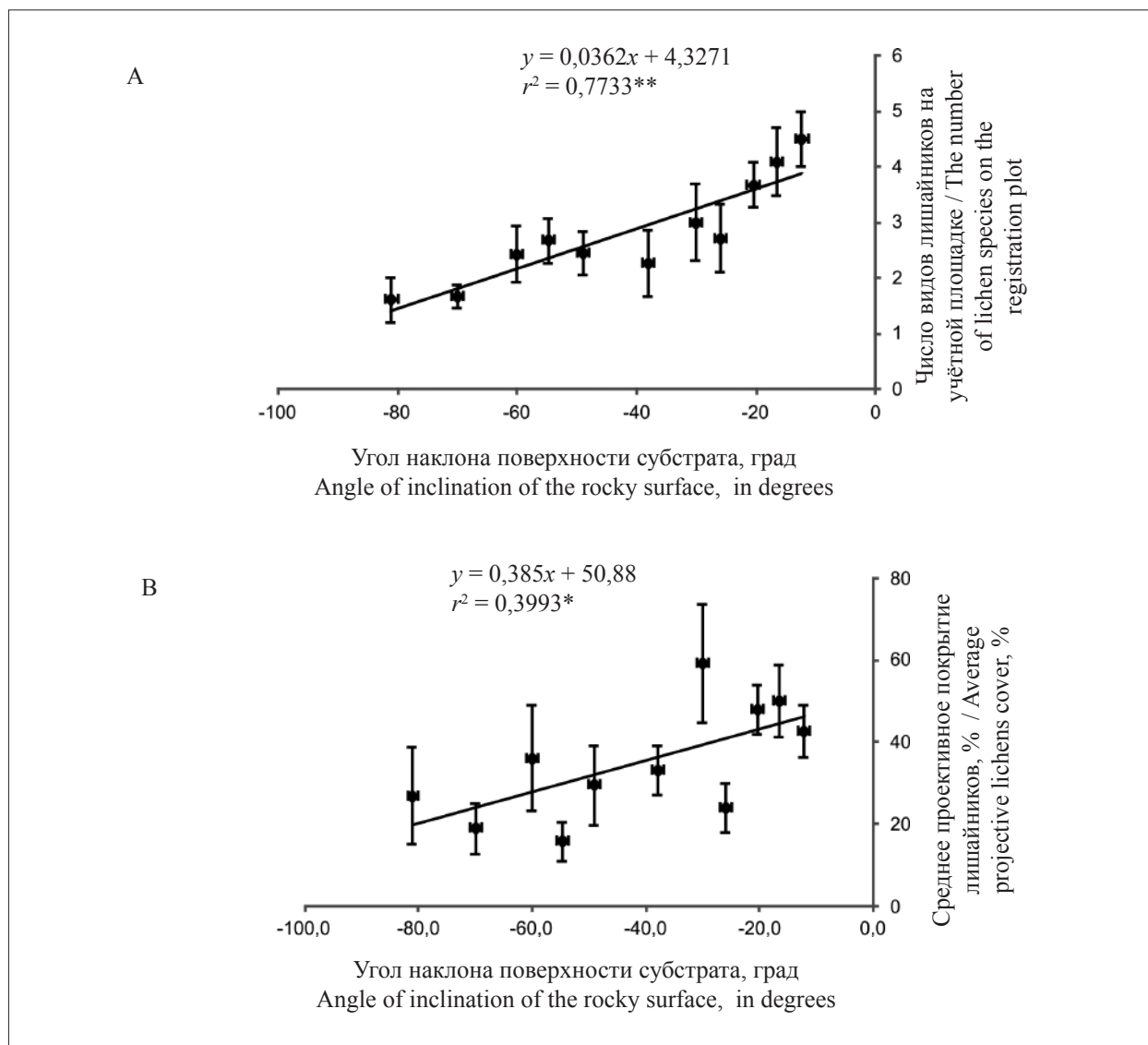


Рис. 3. Изменение общих характеристик лишайникового покрова с выходом на вертикальную поверхность (Оловгора, Ветреный пояс): А – изменение числа видов лишайников на учётной площадке; В – изменение среднего общего проективного покрытия лишайников на учётной площадке; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Fig. 3. Change in the general characteristics of a lichen cover with access to a vertical surface (Olovgora, Vetreniy Poyas): А – the number of the lichen species on the registration plot; В – the average total projective lichens cover on the registration plot; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

изменяются, что, вероятно, связано со сменой видов лишайников в зависимости от светового режима местообитания. Третий тип экотопа характеризуется многообразием субстратных условий, которые зависят от степени зернистости субстрата. Именно для этого экотопа большое значение начинает играть структура субстрата (степень его проработки – наличие ямок, трещин и пр.). Условия освещения на таких типах поверхностей зависят, главным образом, от местоположения камня в фитоценозе. Меньшее число видов в описании (в среднем в описании не более 6–4 видов лишайников), чем, например, на вертикальных поверхностях, может быть связано с межвидовой конкуренцией, которая возникает здесь как между лишайниками, осваивающими более благоприятные местообитания, так и со стороны мохообразных. В лесных экосистемах для формирования эпилитной лишайнофлоры ведущую роль играют факторы освещённости, микро топографии субстрата и конкуренции между видами. Нами не выявлены значимые различия в принципах и условиях формирования эпилитного лишайникового покрова в зависимости от химического состава субстрата.

Заключение

Выявлены общие закономерности в формировании эпилитного лишайникового покрова на каменном субстрате разного генезиса и химического состава в прибрежных и лесных экосистемах.

Состав и структура эпилитного лишайникового покрова в условиях побережья контролируется действием водоёма (у уреза воды) или растительным сообществом (по мере удаления от линии уреза воды).

В лесных скальных сообществах состав и структура эпилитного лишайникового покрова формируется под действием изменяющихся условий освещённости местообитания в зависимости от угла наклона поверхности субстрата, условий микро топографии субстрата и конкуренции.

В пределах исследованных субстратов не выявлено строгой приуроченности видов в зависимости от химического состава горных пород. Предполагаем, что тесная связь может быть обнаружена на ранних этапах заселения обнажений субстратов. В этот период идут процессы регресса субстрата с химическими преобразованиями, миграцией химических элементов и выделением энергии, что может обеспечивать заселение субстратов [16]. Ини-

циальные эпилитные лишайниковые группировки могут отражать тип взаимодействия «субстрат-лишайник».

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке за счёт проекта 5.8740.2017/8.9 базовой части Госзадания Минобрнауки РФ «Комплексная оценка восстановительного потенциала мохового и лишайникового покрова в ходе вторичных автогенных сукцессий в таёжных экосистемах Северо-Запада России» и проекта опорного университета ПетрГУ «Заонежье – 2019».

References

1. Magomedova M.A. Successions of lithophilic lichen communities in the high mountains of the Northern Urals // Ecology. 1979. No. 3. P. 29–38 (in Russian).
2. Pentecost A. Aspect and slope preferences in a saxicolous lichen community // Lichenologist. 1979. V. 11. P. 81–83.
3. Purvis O.W., Halls C.A Review of lichens in metal-enriched environments // Lichenologist. 1996. V. 28. No. 6. P. 571–601. doi: 10.1006/lich.1996.0052
4. Purvis O.W. Adaptation and interaction of saxicolous crustose lichens with metals // Botanical Studies, 2014. V. 55. Article No. 23. doi: 10.1186/1999-3110-55-23
5. Matthes U., Ryan B.D., Larson D.W. Community structure of epilithic lichens on the cliffs of the Niagara Escarpment, Ontario, Canada // Plant Ecology. 2000. V. 148. P. 233–244. doi: 10.1023/A:1009832507791
6. Hansen E.S., Dawes P.R., Thomassen B. Epilithic Lichen communities in high arctic greenland: physical, environmental, and geological aspects of their ecology in ingfield land (78–79°N) // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2006. V. 38, No. 1. P. 72–81. doi: 10.1657/1523-0430(2006)038[0072:ELCINA]2.0.CO;2
7. Rola K., Osyczka P., Kafel A. Different heavy metal accumulation strategies of epilithic lichens colonising artificial post-smelting wastes // Arch Environ Contam Toxicol. 2016. V. 70. P. 418–428. doi: 10.1007/s00244-015-0180-5
8. Paukov A.G., Teptina A.Y., Pushkarev E.V. Heavy metal uptake by chemically distinct lichens from *Aspicilia* spp. growing on ultramafic rocks // Australian Journal of Botany. 2015. V. 63. P. 111–118. doi: 10.1071/BT14255
9. Paukov A., Teptina A., Morozova M., Kruglova E., Favero-Longo S.E., Bishop C., Rajakaruna N. The Effects of edaphic and climatic factors on secondary lichen chemistry: a case study using saxicolous lichens // Diversity. 2019. V. 11. No. 6. Article No. 94. doi: 10.3390/D11060094
10. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Pystina T.N. Ecological and biological, and functional traits of lichens in Taiga zone of European Northeast of Russia //

Theoretical and Applied Ecology. 2020. V. 1. P. 6–13. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-006-013

11. Sonina A.V. Ecotopic distribution of epilithic lichens in rocky forest communities of the Arkhangelsk region // Proceedings of Petrozavodsk State University. Series Natural and Technical Sciences. 2014. No. 2 (139). P. 38–32 (in Russian)

12. Sonina A.V. Species diversity of epilithic lichens in the north-west of Russia // Fundamental Research. 2014. No. 3 (Part 3). P. 512–516 [Internet resource] <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33704> (Accessed: 22.05.2020) (in Russian).

13. Ivanter E.V., Korosov A.V. Elementary biometrics. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2010. 104 p. (in Russian).

14. Sonina A.V., Fadeeva M.A., Markovskaya E.F. Patterns of formation of coastal epilithic lichen communities of the East shore of Lake Onega // Journal of Botany. 2000. V. 79. No. 8. P. 98–106 (in Russian)

15. The Lichen flora of Great Britain and Ireland / Eds. O.W. Purvis, B.J. Coppins, D.L. Hawksworth, P.W. James, D.M. Moore. London: Natural History Museum (in Association with the British Lichen Society), 1992. 710 p.

16. Morakhovskiy V.N. Evolutionary methodology and regressive processes in mineral and organic matter // Notes of the St. Petersburg Mining Institute named after G.V. Plekhanov. 1992. V. 134. P. 132–140 (in Russian).

Рост и развитие люпина узколистного в присутствии лишенобиоты

© 2021. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с.,
А. И. Коротких², аспирант, Ю. С. Забубенина², магистрант,
Л. В. Трефилова², к. б. н., доцент, А. Л. Ковина², к. б. н., доцент,
Е. А. Домнина^{1,3}, к. б. н., доцент, с. н. с., А. С. Тимонов^{1,3}, н. с., инженер,
¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
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: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по определению численности эпифитной микробиоты трёх видов лишайников (*Cladonia rangiferina* (L.), *Cetraria islandica* (L.) и *Peltigera horizontalis* (Huds.)). Установлено, что этот показатель колеблется в пределах 107–251 тыс. КОЕ/г сухой биомассы лишайников. Доминирующей группой микроорганизмов (МО) у *C. rangiferina* и *P. horizontalis* являются бактерии-аммонификаторы, составляющие более 80% в структуре микробных популяций. Для *C. islandica* характерно наиболее равномерное представительство трёх определяемых групп МО (аммонификаторов, азотфиксаторов и микромицетов).

Установлено влияние измельчённой сухой биомассы листоватого лишайника *P. horizontalis* на биометрические показатели роста проростков люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.), которое проявляется в увеличении длины корня, высоты проростка и индекса роста.

В присутствии биомассы лишайников *C. rangiferina* и *P. horizontalis* происходило снижение накопления конечного продукта перекисного окисления липидов – малонового диальдегида (МДА) в побегах (в 1,3 раза) и в корнях (в 1,6–1,8 раза) проростков люпина, что свидетельствует о хороших антиоксидантных свойствах лишайниковой биомассы. Между содержанием МДА в проростках и ростовыми показателями установлена тесная взаимосвязь: чем больше длина корня, высота побега и индекс роста проростков, тем меньше МДА они накапливали.

Таким образом, сухая биомасса лишайника *P. horizontalis* может быть рекомендована к использованию как альтернативный природный ростстимулятор и антиоксидант по отношению к растениям люпина узколистного.

Ключевые слова: кустистые и листоватые лишайники, люпин узколистный, индекс роста, перекисное окисление липидов, ростстимулятор, антиоксидант.

Growth and development of *Lupine angustifolia* L. in the presence of lichen biota

© 2021. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187,
A. I. Korotkikh² ORCID: 0000-0002-0700-371X, Yu. S. Zabubenina² ORCID: 0000-0003-1243-8109,
L. V. Trefilova² ORCID: 0000-0002-9932-5803, A. L. Kovina² ORCID: 0000-0003-0503-3402,
E. A. Domnina^{1,3} ORCID: 0000-0002-5063-8606, A. S. Timonov^{1,3} ORCID: 0000-0001-8560-3051,
¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS,
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: skugoreva@mail.ru, dli-alga@mail.ru

The article presents the results of experimental studies to determine the abundance of the epiphytic microbiota of three species of lichens (*Cladonia rangiferina* (L.), *Cetraria islandica* (L.) and *Peltigera horizontalis* (Huds.)). It was found that this indicator ranges in the interval 107–251 thousand CFU/g of dry biomass of lichens. The dominant group

of microorganisms (MO) in *C. rangiferina* and *P. horizontalis* are ammonifying bacteria, accounting for more than 80% in the structure of microbial populations. *C. islandica* is characterized by the most uniform representation of three definable MO groups (ammonifiers, nitrogen fixers, and micromycetes). Determination of the number of MOs in the sub-lichen soil showed the absence of a rhizogenic effect, while a pronounced rhizosphere effect is constantly observed under higher plants.

The influence of the crushed dry biomass of the leafy lichen *P. horizontalis* on the biometric growth rates of seedlings of *Lupine angustifolius* L., which manifests itself in an increase in root length, seedling height and growth index, has been found.

In the presence of the biomass of the lichens *C. rangiferina* and *P. horizontalis*, there was a decrease in the accumulation of malondialdehyde (MDA) as the final product of lipid peroxidation in the shoots (1.3 times) and in the roots (1.6–1.8 times) of lupine seedlings, which indicates the good antioxidant properties of lichen biomass. A close relationship was found between the MDA content in seedlings and growth parameters: the longer the root, shoot and seedling growth index, the less MDA they accumulated.

Thus, the dry biomass of *P. horizontalis* lichen can be recommended for use as an alternative natural growth stimulator and antioxidant in relation to plants of *Lupine angustifolia* L.

Keywords: fructose and leafy lichens, *Lupine angustifolia* L., growth index, lipid peroxidation, growth stimulant, antioxidant.

Лишайники представляют собой уникальную группу симбиотических организмов, в слоевищах которых микромицеты ассоциированы с водорослями или цианобактериями. Благодаря присутствию фотобионтов лишайники становятся автотрофной мутуалистической системой, в которой на долю фотосинтезирующего партнёра приходится примерно 10% биомассы таллома, а грибной партнёр (микобионт) образует среду обитания для фотобионта [1, 2]. Кроме того, в микробных сообществах лишайников постоянно обнаруживаются различные виды сапротрофных бактерий, дрожжи и простейшие [1]. Бактерии на поверхности талломов способны образовывать скопления наподобие биоплёнок, состоящих из отдельных мелких колоний. Более того, установлено, что бактерии могут проникать в клетки грибов, хотя и без наличия эндоцеллюлярной биотрофии [3].

В последние годы лишайники пытаются использовать не только в качестве биоиндикаторов на загрязнение окружающей среды, но и в качестве потенциального источника различных биологически активных веществ [4–7]. В наших предыдущих исследованиях, в частности, была установлена возможность использования биомассы листоватых лишайников *Parmelia sulcata* Tayl. и *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. в качестве альтернативного ростостимулятора для люпина узколистного [8].

Цель данной работы – изучить влияние двух видов кустистых (*Cladonia rangiferina* (L.), *Cetraria islandica* (L.)) и одного вида листоватого (*Peltigera horizontalis* (Huds.)) лишайников на рост и развитие люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.).

Объекты и методы исследования

Объектами исследования были талломы трёх видов лишайников (кустистые хлороли-

шайники *Cladonia rangiferina* (L.), *Cetraria islandica* (L.) и цианолишайник *Peltigera horizontalis* (Huds.) – листоватый), а также подлишайниковая почва, отобранные в октябре 2020 г. в сосняке лишайниково-зеленомошном (Советский район Кировской области). Для сравнения микробиологического обилия в образцах в качестве контрольной отбирали почву без лишайников с глубины 0–5 см. Ростстимулирующую активность лишайников тестировали на семенах и проростках люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.).

Для оценки численности эпифитной микробиоты лишайников применяли посев смывов с талломов на селективные агаризованные среды. Численность микроорганизмов (МО) в почве и на талломах лишайников учитывали методом предельных разведений, определяя 3 физиологические группы: аммонификаторы на среде ГРМ (гидролизат рыбной муки), азотфиксаторы на среде Эшби и микромицеты на среде Чапека. Посев на каждую питательную среду проводили в трёхкратной повторности.

При выращивании люпина использовали метод рулонных культур, помещённых в пластиковые контейнеры, в 4-х кратной повторности из расчёта 15 семян на рулон. Контролем был вариант с помещением рулонных культур в артезианскую воду. Слоевища лишайников высушивали до воздушно-сухого состояния, затем измельчали сухую биомассу в электромельнице марки «BOSCH MK 6000» до порошкообразного состояния. В опытных вариантах измельчённую биомассу лишайников в количестве 1 г на повторность вносили непосредственно поверх семян. Для увлажнения использовали артезианскую воду. При снятии опыта через 7 суток определяли всхожесть семян, длину корней, высоту проростков, индекс роста по формуле:

$$I = (R + P) \cdot D,$$

где I – индекс роста (условные единицы), R – суммарное значение длин корней (см), P – суммарное значение длин проростков (см), D – доля проросших семян (%) [9].

При воздействии различных стресс-факторов усиливается образование свободных радикалов, которые в свою очередь индуцируют процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) и вызывают развитие деструктивных процессов как на уровне клетки, органа, так и всего организма [10]. Об интенсивности процессов ПОЛ в тканях растений может свидетельствовать накопление одного из его конечных продуктов – малонового диальдегида (МДА).

Содержание МДА в тканях 7-суточных проростков люпина определяли по цветной реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК). Непосредственно перед определением готовили вытяжку из свежих тканей корней и побегов 10 растений. К вытяжке добавляли 0,5% раствор ТБК в 20% трихлоруксусной кислоте, кипятили 30 мин на водяной бане и фильтровали. Содержание МДА определяли спектрофотометрическим методом по интенсивности окраски полученного фильтрата при $\lambda = 532$ нм [11]. Повторность определения МДА шестикратная.

Полученные данные статистически обработаны в программе Microsoft Excel.

В таблицах и на рисунке приведены средние арифметические значения и ошибки средних. Достоверность различий с контролем оценивали по критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Численность микробиоты лишайников и подлишайниковой почвы. Количественный учёт эпифитной микробиоты 3-х видов лишайников показал, что предел колебаний общей численности изучаемых групп МО составляет 107–251 тыс. КОЕ/г (табл. 1). По этому показателю исследуемые виды лишайников составляют ряд *C. rangiferina* (хлоролишайник) > *P. horizontalis* (цианолишайник) > *C. islandica* (хлоролишайник). Однако анализ результатов по отдельным группам МО показывает, что в структуру микробных популяций максимальный вклад вносят разные физиологические группы: аммонификаторы составляют более 80% у *C. rangiferina* и *P. horizontalis* с минимальной численностью микромицетов и бактерий-азотфиксаторов. Наиболее равномерное представительство микробных группировок характерно для цианолишайника *C. islandica* с максимальным вкладом азотфиксаторов в структуру микробных популяций.

Численность МО в подлишайниковой почве под *C. islandica* и *P. horizontalis* прак-

Таблица 1 / Table 1
Численность микробиоты лишайников и подлишайниковой почвы ($\cdot 10^3$ КОЕ/г, в числителе) и соотношение различных группировок (% в знаменателе)
The number of microbiota of lichens and of sub-lichen soil ($\cdot 10^3$ CFU/g, in the numerator) and the ratio of various groups (% in the denominator)

Вариант Variant	Аммонификаторы Ammonifiers	Азотфиксаторы Nitrogen fixers	Микромицеты Micromycetes	Всего Total
Талломы лишайников / Thalli of lichens				
<i>Cladonia rangiferina</i>	$\frac{210,0 \pm 26,0}{83,67}$	$\frac{25,3 \pm 6,6}{10,08}$	$\frac{15,7 \pm 2,3}{6,25}$	$\frac{251,0 \pm 34,9}{100,00}$
<i>Cetraria islandica</i>	$\frac{53,0 \pm 5,0}{49,40}$	$\frac{37,3 \pm 4,7}{34,76}$	$\frac{17,0 \pm 0,5}{15,84}$	$\frac{107,3 \pm 10,2}{100,00}$
<i>Peltigera horizontalis</i>	$\frac{127,0 \pm 23,0}{81,57}$	$\frac{15,0 \pm 1,7}{9,63}$	$\frac{13,7 \pm 2,1}{8,80}$	$\frac{155,7 \pm 26,8}{100,00}$
Почва / Soil				
Контроль / Control	$\frac{140,0 \pm 10,0}{45,22}$	$\frac{84,3 \pm 1,5}{27,23}$	$\frac{85,3 \pm 6,0}{27,55}$	$\frac{309,6 \pm 17,5}{100,00}$
<i>Cladonia rangiferina</i>	$\frac{93,0 \pm 11,0^*}{50,35}$	$\frac{40,0 \pm 4,5^*}{21,66}$	$\frac{51,7 \pm 6,8^*}{27,99}$	$\frac{184,7 \pm 22,3^*}{100,00}$
<i>Cetraria islandica</i>	$\frac{177,0 \pm 30,0}{52,90}$	$\frac{72,3 \pm 9,0}{21,61}$	$\frac{85,3 \pm 6,1}{25,49}$	$\frac{334,6 \pm 45,1}{100,00}$
<i>Peltigera horizontalis</i>	$\frac{163,0 \pm 5,0}{49,35}$	$\frac{79,0 \pm 1,0}{23,92}$	$\frac{88,3 \pm 5,1}{26,73}$	$\frac{330,3 \pm 10,2}{100,00}$

Примечание: * – различия с контролем достоверны при $p < 0,05$.
Note: * – differences with control are significant at $p < 0.05$.

Таблица 2 / Table 2

Влияние лишайников на рост и развитие люпина узколистного
The influence of lichens on the growth and development of *Lupinus angustifolius* L.

Вариант Variant	Всхожесть, % Germination, %	Длина корня, см Length of root, cm	Высота проростка, см Height of seedlings, cm	Индекс роста, условные единицы Growth Index, conventional units
	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>I</i>
Контроль / Control	75,0±13,7	4,0±0,6	5,5±0,3	712,5
<i>Cladonia rangiferina</i>	70,0±13,8	5,1±0,9	5,1±0,7	714,0
<i>Cetraria islandica</i>	71,6±13,7	4,5±0,2	5,3±0,3	701,6
<i>Peltigera horizontalis</i>	66,7±14,8	6,9±0,8*	9,1±1,6**	1067,2

Примечание: различия с контролем достоверны при * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.
Note: differences with control are significant when * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

тически не отличается от контрольной почвы. Под *C. rangiferina* значения численности МО в почве в 1,5–2 раза ниже по сравнению с контролем. Однако во всех почвенных образцах нет яркого доминирования какой-то одной физиологической группы МО: во всех вариантах наблюдается приблизительно равное представительство аммонификаторов (45–52%), азотфиксаторов и грибов по 23–27% (табл. 1). В отличие от высших растений с наличием ярко выраженного ризосферного эффекта, подобного явления под ризинами (грибными гифами, определяющими прикрепление лишайника к субстрату) лишайников в данном случае не выявлено.

Влияние лишайников на биометрические показатели проростков люпина. Изучение результатов по влиянию измельчённой биомассы лишайников на всхожесть и биометрические показатели люпина узколистного показали, в первую очередь, разницу в действии кустистых и листоватого лишайников. Так, хотя листоватый лишайник *P. horizontalis* снижал всхожесть семян люпина, по сравнению с контролем, с 75% до 66,7%, тем не менее, показатели длины корня и высоты проростка максимальные именно в этом варианте (табл. 2). Значение интегрального показателя (индекса роста) также максимальное в данном варианте и превышает аналогичное значение в контроле в 1,5 раза. Оба вида кустистых лишайников по всем изученным показателям практически находятся на уровне контроля.

Возможно, ростстимулирующая активность лишайников связана не только с их вторичными метаболитами, так как из литературных обзоров [1] известно, что многие бактерии-эпифиты лишайников способны продуцировать гормоны (индолилуксусную кислоту, этилен), которые в данном опыте оказывают влияние на высшее растение.

Накопление малонового диальдегида проростками люпина. Во всех вариантах опыта побеги проростков люпина узколистного характеризовались более низким содержанием МДА, чем корни (рис.). При этом для контрольного варианта различие в накоплении МДА корнями и побегами было более существенным, чем в вариантах с лишайниками.

Различные виды лишайников оказывали разное действие на биохимические процессы в проростках люпина. В присутствии биомассы хлоролишайника *C. islandica* содержание МДА в проростках изменялось незначительно по сравнению с контролем.

В присутствии биомассы хлоролишайника *C. rangiferina* и цианолишайника *P. horizontalis*, отмечали достоверное снижение накопления МДА побегами люпина в 1,3 раза по сравнению с контролем. Корни проростков оказались наиболее подвержены действию лишайниковой биомассы. Под влиянием *C. rangiferina* и *P. horizontalis* содержание МДА в корнях растений было в 1,6 и 1,8 раза ниже, чем в контроле соответственно.

Таким образом, корни растений, имеющие прямой контакт с биомассой лишайников, оказались более чувствительными к её действию, что подтверждается и данными, полученными ранее в опытах с листовыми лишайниками – пармелией и гипогимнией [8].

Выявлена высокая прямая корреляционная взаимосвязь между значениями всхожести семян люпина и содержанием МДА в проростках ($r = 0,75–0,95$) (табл. 3). С ростовыми показателями проростков корреляционная связь была не такой высокой и обратной, т. е. чем длиннее был корень, выше побег и больше индекс роста проростков, тем меньше МДА они накапливали. При этом для корней проростков значения коэффициентов корреляции были выше.

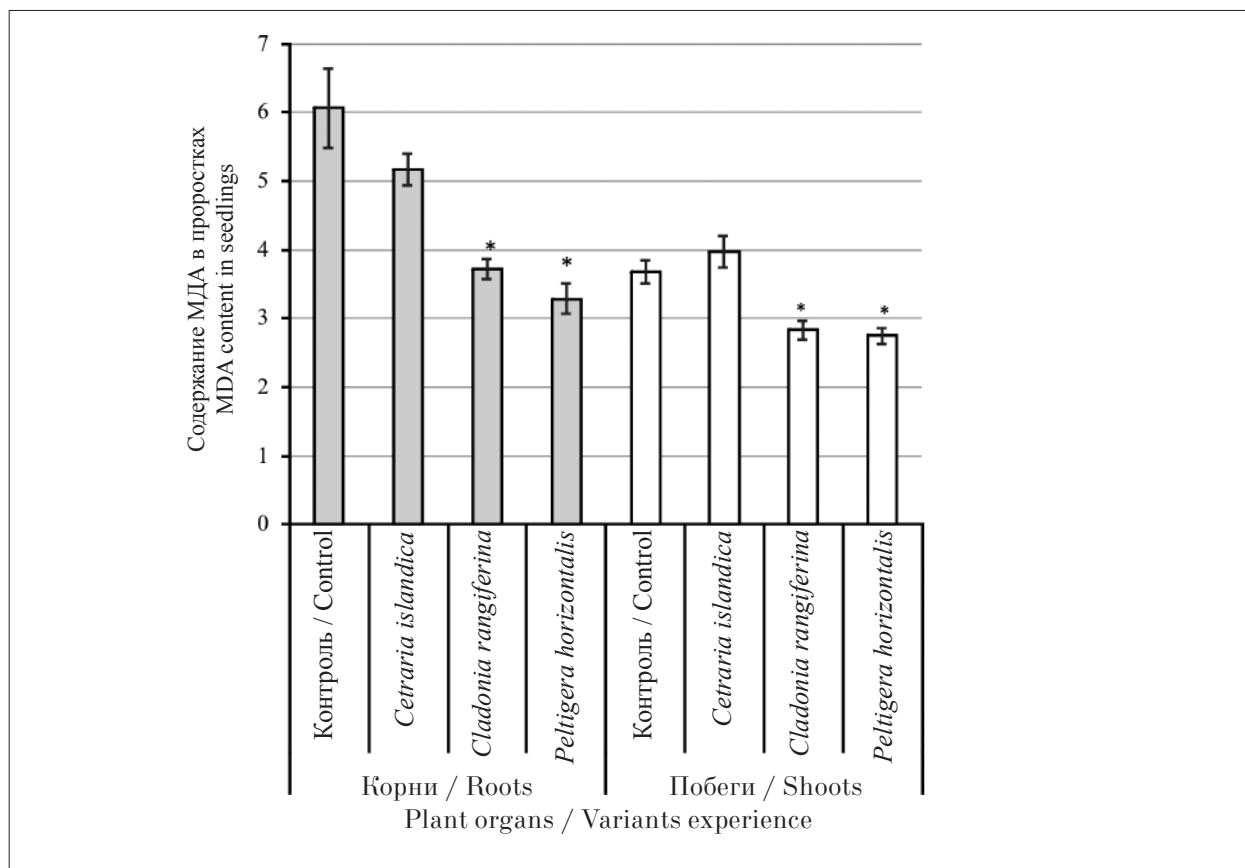


Рис. Содержание малонового диальдегида в проростках люпина узколистного, мкмоль/г сырой массы (* – различия с контролем достоверны при $p < 0,01$)

Fig. Malondialdehyde (MDA) content in narrow-leaved lupine seedlings, μmol/g of fresh mass (* – differences with control are significant at $p < 0.01$)

Таблица 3 / Table 3

Корреляционная связь (r) между содержанием МДА в проростках люпина и всхожестью семян, ростовыми параметрами растений люпина, численностью микробиоты на талломах лишайников
 Correlation relationship (r) between the MDA content in lupine seedlings and seed germination, growth parameters of lupine plants, the number of microbiota on lichen thalli

Содержание МДА / Malondialdehyde content	Всхожесть семян люпина / Lupine seed germination	Ростовые параметры проростков люпина / Growth parameters of lupine seedlings			Численность микробиоты лишайников / The number of lichen microbiota		
		длина корня / length of root	высота проростка / height of seedlings	индекс роста / growth index	аммонификаторы / ammonifiers	азотфиксаторы / nitrogen fixers	микробиоты / micromycetes
Корни / Roots	0,95	-0,88	-0,59	-0,67	-0,71	0,97	0,91
Побеги / Shoots	0,75	-0,78	-0,56	-0,63	-0,82	0,91	0,83

Достаточно высокая сила корреляционной связи была между содержанием МДА в проростках и численностью МО на талломах лишайников. Чем выше была численность аммонификаторов, тем меньше было накопление МДА проростками люпина ($r = -0,71--0,82$). Напротив, с уменьшением численности азотфиксаторов и микромицетов

на талломах снижалось содержание МДА в проростках ($r = 0,83--0,97$).

Из приведённого следует, что сухая биомасса лишайника *C. islandica* не оказала заметного влияния на содержание МДА в проростках люпина узколистного. Биомасса лишайников *C. rangiferina* и *P. horizontalis* приводила к достоверному снижению нако-

пления МДА проростками, особенно в корнях. Снижение уровня МДА в присутствии данных видов лишайников может свидетельствовать о снижении процессов ПОЛ в тканях проростков. Особенно низкий (по сравнению с контролем) уровень накопления МДА в варианте с биомассой *P. horizontalis* указывает на наибольший положительный эффект лишайника на рост и развитие растений люпина, что подтверждается максимальными значениями ростовых показателей (табл. 2).

Таким образом, сухая биомасса используемых в работе лишайников не является стресс-фактором для проростков люпина. Напротив, особенно в случае с цианолишайником *P. horizontalis*, она обладает выраженными антиоксидантными свойствами, благодаря которым происходит снижение уровня ПОЛ в растительных тканях.

Выводы

1. Численность МО в эпифитных микробиомах лишайников составила 107–251 тыс. КОЕ/г сухой биомассы. По этому показателю исследуемые виды лишайников составляют ряд *C. rangiferina* (хлоролишайник) > *P. horizontalis* (цианолишайник) > *C. islandica* (хлоролишайник). В микробиомах *C. rangiferina* и *P. horizontalis* доминируют аммонификаторы (более 80%), для *C. islandica* характерно наиболее равномерное представительство микробных группировок.

2. Анализ подлишайниковых почв показал, что нет яркого доминирования какой-то одной физиологической группы МО (аммонификаторов, азотфиксаторов и микромицетов).

3. По результатам модельного эксперимента отмечали стимулирование роста проростков люпина узколистного в присутствии сухой биомассы листоватого цианолишайника *P. horizontalis*: увеличение длины корня, высоты побега и индекса роста по сравнению с контролем. Для кустистых лишайников не выявлено достоверного влияния на всхожесть семян и ростовые параметры проростков.

4. В присутствии биомассы лишайников *C. rangiferina* и *P. horizontalis* происходило снижение накопления МДА в проростках люпина. Особенно ярко данный эффект проявился в тканях корней, которые имели прямой контакт с лишайниками. Уменьшение накопления МДА в проростках свидетельствует о хороших антиоксидантных свойствах лишайниковой биомассы.

5. Между содержанием МДА в проростках и ростовыми показателями установлена

корреляционная взаимосвязь: чем больше длина корня ($r = -0,78$ – $-0,88$), высота побега ($r = -0,56$ – $-0,59$) и индекс роста ($r = -0,63$ – $-0,67$) проростков, тем меньше МДА они накапливали.

Таким образом, по результатам проведенного исследования сухая биомасса лишайника *P. horizontalis* может быть рекомендована к использованию как альтернативный природный ростостимулятор и антиоксидант по отношению к растениям люпина узколистного.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Pankratov T.A., Kachalkin A.V., Korchikov E.S., Dobrovolskaya T.G. Microbial communities of lichens // *Mikrobiologiya*. 2017. V. 86. No. 3. P. 265–283 (in Russian).
2. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Pystina T.N. Ecological, biological and functional properties of lichens in the taiga zone of the European North-East of Russia (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-006-013
3. Cardinale M., Puglia A. M., Grube M., Molecular analysis of lichen-associated bacterial communities // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2006. V. 57. P. 484–495. doi: 10.1111/j.1574-6941.2006.00133.x
4. Byazrov L.G. Lichens in environmental monitoring. Moskva: Nauchnyy mir, 2002. 336 p. (in Russian).
5. Boustiel J., Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites // *Plant Genetic Resources*. 2005. V. 3. No. 2. P. 273–287. doi: 10.1079/PGR200572
6. Kosanić M., Ranković B. Lichen as possible sources of antioxidants // *Pak. J. Pharm. Sci.* 2011. V. 24. No. 2. P. 165–170.
7. Khranchenkova O.M. The influence of the biomass of epiphytic lichens on the germination of seeds of cereal crops // *Nauka i innovatsii*. 2017. No. 5 (171). P. 68–72 (in Russian).
8. Domracheva L.I., Kovina A.L., Ogorodnikova S.Yu., Korotkikh A.I., Korotkova A.V., Domnina E.A. Growth-stimulating activity of foliose lichens // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 130–135 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-130-135
9. Abdul-Baki A.A., Anderson J.D. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria // *CropScience*. 1973. V. 13. P. 630–633. doi: 10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x
10. Vladimirov Yu.A., Archakov A.I. Lipid peroxidation in biological membranes. Moskva: Nauka, 1972. 252 p. (in Russian).
11. Lukatkin A.S. Cold damage to thermophilic plants and oxidative stress. Saransk: Izdatelstvo Mordovskogo universiteta, 2002. 208 p. (in Russian).

Оценка выживаемости и роста потомства лиственницы (*Larix*) разного географического происхождения в Восточном Забайкалье

© 2021. Л. Н. Пак, к. с.-х. н., доцент,
Тверской государственной университет,
170002, Россия, г. Тверь, проспект Чайковского, д. 70,
e-mail: pak_lar@bk.ru

В статье рассмотрен один из перспективных методов изучения ответной реакции растений на потепление климата – испытание видов и климатических экотипов основных видов-лесообразователей в географических культурах. Лиственница – самый распространённый вид на территории нашей страны и Восточного Забайкалья. Географические культуры лиственницы (ГКЛ) Восточного Забайкалья входят в состав широкомасштабного эксперимента по созданию и изучению сети эколого-географических культур основных лесообразующих видов на территории бывшего СССР. Всего были испытаны потомства 5 видов и 20 климатипов лиственницы. Результаты выживаемости представленной коллекции лиственницы свидетельствуют о том, что в первом классе возраста определяющим фактором устойчивости потомства лиственницы разных климатипов является происхождение материнских популяций. У оставшихся особей в популяциях (60%) наблюдаются высокие результаты изменчивости рассматриваемых показателей (в среднем по выживаемости, диаметру и высоте – 32%), что указывает на значительную степень сходства их генотипического состава к природно-климатическим факторам региона. Стандартные отклонения рассматриваемых показателей были небольшими, лежали в основном в пределах 2–3 σ . Лучшими потомствами из коллекции ГКЛ оказались: лиственница Сукачёва из Сведловской области (ивдельская и егоршинская популяции); лиственница сибирская из Алтая, Хакасии (октябрьская и бирикчуйская популяции), Красноярского края, Иркутской области (качугская популяция) и Бурятии; лиственница Гмелина из Забайкальского края и Амурской области; лиственница Чекановского из Забайкальского края.

Ключевые слова: Восточное Забайкалье, Читинское лесничество, географические культуры, лиственница, климатип, выживаемость, рост.

Evaluation of survival and growth of larch (*Larix*) progeny of different geographical origin in Eastern Transbaikalia

© 2021. L. N. Pak ORCID: 0000-0002-3635-8675⁷
Tver State University,
70, Tchaikovsky Avenue, Tver, Russia, 170002,
e-mail: pak_lar@bk.ru

The article considers one of the promising methods of studying the response of plants to climate warming – testing of species and climatic ecotypes of the main species – forest growers in geographical cultures. Larch is the most common species on the territory of Russia and Eastern Transbaikalia in particular. Larch geographical cultures (LGC) of Eastern Transbaikalia are part of a large-scale experiment to create and study a network of ecological and geographical cultures of the main forest-forming species in the territory of the former USSR. Totally the progeny of 5 species and 20 climatypes of larch were tested. The results of survival of the presented collection of larch indicate that in the first class of age the determining factor in the stability of the larch offspring of different climatypes is the origin of the parent populations. In the remaining individuals in populations (60%) there are high results of variability of the considered parameters (in average, on survival, diameter and height – 32%), which indicates a significant degree of similarity of their genotypic composition to natural and climatic factors of the region. The standard deviations of the considered parameters were small, mostly within 2–3 σ . The best progenies from the collection of the LGC are: the Sukachev larch from Sverdlovsk region (Ivdel and Egorshino population); Siberian larch from the Altay, Khakassia (Octyabr and Birikchul population), the Krasnoyarsk territory, the Irkutsk region (Kachug population) and Buryatia; Dahurian larch from the Transbaikal region and Amur region; the Chekanovsky larch from Transbaikal region.

Keywords: Eastern Transbaikalia, Chita forestry, geographical culture, larch, climate, survival, growth.

Многочисленные публикации, основанные на прямых и косвенных источниках, свидетельствуют о происходящем на протяжении прошлого и начала нынешнего веков потеплении климата [1–6]. Это может сильно сказаться на возможности растений произрастать в определённой жизненной форме, возможности возобновления семенным путём, проявлении необходимых хозяйственных качеств и т. п.

Одним из перспективных методов изучения ответной реакции растений на быстрые изменения климата с учётом места их происхождения являются испытания видов и климатических экотипов или климатипов основных видов-лесообразователей в географических культурах [7].

Многочисленные современные исследования показывают, что основные лесообразующие виды, попадая в среду, характерную для других природно-климатических и географических условий, по-разному реагируют на почвенно-климатические изменения [8–17]. Наиболее чувствительными живыми индикаторами являются хвойные древесные растения. Они способны откликаться на повреждения почвенно-климатических факторов на разных уровнях организации [18–19]. Выживаемость и рост географических культур являются основными показателями популяционно-видового уровня, имитирующего ситуацию быстрых климатических изменений, смещения границ лесорастительных зон.

Лиственница – самый распространённый вид на территории нашей страны и Восточного Забайкалья (Забайкальский край). Её доля в лесной площади составляет, соответственно, около 40 и 60% (на 01.01.2017 г.).

Географические культуры лиственницы (ГКЛ) Восточного Забайкалья входят в состав широкомасштабного эксперимента по созданию и изучению сети эколого-географических культур основных лесообразующих видов на территории бывшего СССР, начатого в 70-х годах прошлого столетия [20]. Началом исследований ГКЛ в регионе является 1975 г. В этот год сотрудниками ИЛиД СО РАН были посеяны семена первых «перемещаемых» 17 климатипов. Позднее, в 1977 г., дополнительно провели посев семян ещё 8 «перемещаемых» климатипов. По факту создания географических культур (ГК) в 1999 г. проведена всероссийская инвентаризация, после которой, до 2016 г., изучение коллекции в регионе проводилось выборочно по климатипам [21].

Цель настоящих исследований заключалась в оценке индивидуальной адаптивности потомств на основании возрастной и экологической изменчивости ряда показателей.

Объект и методы исследования

Объект исследований – ГКЛ, расположенные в пределах Читинского лесничества края. Площадь объекта 14,0 га, имеет однородные почвенные, климатические условия и рельеф. Макрорельеф – равнина. Почвы – супесчаные, дерновые, слабоподзоленные. Климат характеризуется целым рядом неблагоприятных факторов: средняя годовая температура воздуха $-2,7^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого холодного месяца (января) $-25--30^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого теплого месяца (июля) $+19-20^{\circ}\text{C}$. В марте-апреле температура воздуха колеблется от $-15--20^{\circ}\text{C}$ ночью до $+10-15^{\circ}\text{C}$ днём, в сентябре – октябре – от $+10-15^{\circ}\text{C}$ до $-15--20^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков – 320–360 мм. Минимум осадков выпадает в апреле-июне. В это время стоит сухая, с низкой относительной влажностью воздуха (15–20%) погода.

Географические культуры лиственницы созданы в начале 80-х годов прошлого столетия. Посадка выполнялась крупномерными сеянцами, по схеме $2,5 \times 0,75$ м. Число повторностей менялось и зависело от числа выращенного посадочного материала. Были испытаны потомства 5 видов и 20 климатипов лиственницы из присланных семян с территории бывшего Советского Союза (табл. 1). На период исследований возраст культур – II класс. Этот возраст позволил оценить адаптивность популяций по ряду показателей в динамике. Изучение индивидуальной адаптивности климатипов проводили по трём показателям: выживаемость, высота и диаметр.

Каждый климатип обследовали с помощью сплошного учёта всех живых и усохших деревьев, числа пней и числа пустых посадочных мест. Эти данные сравнивали с числом семян, высаженных при создании культур. У всех живых деревьев в климатипах измеряли диаметр на высоте груди. Высоту определяли по графикам высот с помощью измерения высотомером по каждой 1 см ступени толщины. Данные выживаемости на 1999 г. брали из материалов инвентаризации, проведённой Читинской зональной лесосеменной станцией совместно с сотрудниками ИПРЭЖ СО РАН.

Для популяционно-видовой оценки климатипов использовали относительный коэф-

фициент – стандартное отклонение рассматриваемого показателя (выживаемости, высоты и диаметра) от среднего значения в коллекции. По выживаемости, диаметру и высоте рассчитывали среднее значение. Использование относительного коэффициента даёт возможность объединить и сопоставить показатели с разными единицами измерений. Все климатипы согласно относительного коэффициента делили на группы: худшие (ниже -0,5, -0,5–0) и лучшие (0–+0,5, выше +0,5) потомства. Оценку влияния происхождения климатипа на рассматриваемые показатели проводили с использованием дисперсионного и корреляционного анализа.

Результаты и обсуждение

В Восточном Забайкалье ГКЛ представляют собой формирующееся насаждение 35-летнего возраста. Испытание всех представленных в коллекции климатипов показало на их неоднозначную реакцию на средовые факторы. В ходе сравнительного анализа выживаемости климатипов 1999 и 2016 гг. было установлено общее снижение численности коллекции на 22,0% (табл. 2). Средняя выживаемость семенных потомств в коллекции на 2016 г. составила 26,8%, что не превышает 1,0 тыс. шт./га.

Элиминация семенного потомства популяции лиственницы сибирской из Курчумского лесхоза отмечалась ещё во время инвентаризации 1999 г., в возрасте до 20 лет. К 2016 г. произошла полная элиминация потомства популяции лиственницы Каяндера из Охотского лесхоза и лиственницы Сукачёва из Волжского лесхоза.

Данные выживаемости и роста климатипов в единицах стандартного отклонения за 2016 г. колебались от -5,7 до +9,3 (табл. 3).

По результатам оценки выживаемости 2016 г., в группу худших потомств (без учёта выше названных) попали популяции лиственницы Сукачёва из Башкортостана, лиственницы сибирской из Восточно-Казахстанской и Иркутской областей, лиственницы Гмелина из Амурской области. У этих климатипов данные стандартного отклонения (σ) были ниже -0,5. В группу более устойчивых (стандартное отклонение выше +0,5) вошли 9 климатипов: лиственница Сукачёва из Сведловской области (3 популяции); лиственница сибирская из Алтая, Хакасии (1 популяция), Красноярского края и Бурятии; лиственница Гмелина из Забайкальского края (1 популяция); лиственница Чекановского из Забайкальского края.

Распределение климатипов по диаметру на основании данных стандартного отклонения практически совпадает с данными по выживаемости. В группу лучших из коллекции вошло 11 потомств: лиственницы Сукачёва из Башкортостана, Сведловской области (1 популяция); лиственницы сибирской из Алтая, Хакасии (2 популяции), Красноярского края, Иркутской области (1 популяция) и Бурятии; лиственницы Гмелина из Забайкальского края (1 популяция) и Амурской области; лиственницы Чекановского из Забайкальского края.

По высоте распределение климатипов на группы немного меняется. Из 9–11 лучших потомств по выживаемости и радиальному росту (σ выше +0,5) остаётся всего 7. Это популяция лиственницы Сукачёва из Сведловской области (2 популяции); лиственницы сибирской из Хакасии (2 популяции), Красноярского края; лиственницы Гмелина из Забайкальского края (1 популяция); лиственницы Чекановского из Забайкальского края.

Оценка адаптивности потомств на основании среднего стандартного отклонения, полученного по ряду показателей, позволила выделить лучшие потомства: лиственницы Сукачёва из Сведловской области (ивдельская и егоршинская популяции); лиственницы сибирской из Алтая, Хакасии (октябрьская и бирикчульская популяции), Красноярского края, Иркутской области (качугская популяция) и Бурятии; лиственницы Гмелина из Забайкальского края и Амурской области; лиственницы Чекановского из Забайкальского края.

Между средними значениями рассматриваемых показателей обнаружена тесная корреляционная связь: $r = 0,65–0,70$.

Результаты выживаемости представленной коллекции лиственниц свидетельствуют о том, что в первом классе возраста определяющим фактором устойчивости потомства лиственницы разных климатипов является происхождение материнских популяций. В это время происходит элиминация основной части генотипов «перемещаемых» климатипов (25%), неустойчивых к ряду факторов среды, имеющих хорошую «память» о районах их происхождения. У оставшихся особей в популяциях (60%) наблюдаются высокие результаты изменчивости рассматриваемых показателей (в среднем по выживаемости, диаметру и высоте – 32%), что указывает на значительную степень сходства их генотипического состава к природно-климатическим факторам региона.

Виды и климатыпы лиственницы в географических культурах лиственницы / Species and climates of larch in the geographical larch crops
 Таблица 1 / Table 1

край, область, республика territory, region, republic	Происхождение семян The origin of the seeds	лесхоз forestry	Координаты Geographic coordinates		Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	Годовая сумма температур воздуха выше 10 °С Annual sum of air temperatures above 10 °C	Годовая сумма осадков, мм Annual amount of precipitation, mm	
			с. ш. northern latitude	в. д. eastern longitude				
Лиственница Сукачёва (<i>L. sukaczewii</i> Dylis) / Larch Sukacheva (<i>L. sukaczewii</i> Dylis)								
Ивановская / Ivanovskaya	Воляжский / Volzhsky		57°00'	41°75'	103	1950	550	
Башкортостан / Bashkortostan	Учалинский / Uchalinsky		54°00'	56°00'	400	1900	400	
Свердловская / Sverdlovskaya	Ивдельский / Ivdelsky		60°42'	60°26'	740	1950	650	
	Новолялинский / Novolyalinsky		59°04'	60°58'	188	1950	650	
	Егоршинский / Egorshinsky		57°33'	61°90'	180	1950	650	
Лиственница сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.) / Siberian larch (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)								
Восточно-Казахстанская East Kazakhstanskaya	Курчумский / Kurchumsky		48°56'	83°64'	1500	2600	550	
Алтай / Altai	Маркакольский / Markakolsky		48°76'	85°76'	1400	1800	500	
	Чемальский / Chemalsky		51°96'	85°91'	305	1800	584	
Хакасия / Khakassia	Бирючуйский / Biryuchul'sky		53°35'	89°88'	554	2000	500	
	Октябрьский / Oktyabrsky		53°27'	91°23'	1000	2000	500	
Красноярский / Krasnoyarsky	Верхне-Манский / Upper-Mansky		55°07'	93°76'	459	1800	450	
	Иркутская / Irkutskaya		56°08'	101°12'	800	1700	400	
Бурятия / Buryatia	Закаменский / Zakamensky		50°44'	103°30'	1000	1700	370	
	Качугский / Kachugsky		54°06'	106°37'	533	1700	360	
Лиственница Чекановского (<i>L. czekanowskii</i> Szaf) / Larch Of Chekanovsky (<i>L. czekanowskii</i> Szaf)								
Забайкальский / Zabaikalsky	Петровск-Забайкальский Petrovsk-Zabaykal'sky		51°27'	108°84'	800	1700	350	
	Лиственница Гмелина (<i>L. gmelinii</i> Rupr.) / Dahurian Larch (<i>L. gmelinii</i> Rupr.)							
Забайкальский / Zabaikalsky	Читинский / Chitinsky		52°11'	114°02'	670	1700	350	
	Могочинский / Mogochinsky		53°42'	120°07'	620	1700	350	
Амурская / Amurskaya	Свободненский / Svobodnensky		51°25'	127°43'	578	2100	500	
	Амгунский / Amgunsky		49°57'	135°91'	72	2200	600	
Хабаровский / Khabarovsky	Лиственница Каяндера (<i>L. sajánderi</i> Mayr) / Sajanderi Larch (<i>L. sajánderi</i> Mayr)							
	Охотский / Okhotsky		60°17'	142°06'	13	2000	600	

Таблица 2 / Table 2

Климатипы лиственницы в географических культурах лиственницы и их показатели по регионам
Climatetypes of larch in geographical larch crops and their indicators by region

Край, область, республика Territory, region, republic	Выживаемость на 1999 г., % Survival on 1999, %	Выживаемость на 2016 г., % Survival on 2016, %	Диаметр, см Diameter cm	Высота, м Height, m
Ивановская / Ivanovskaya	4,2	0	0	0
Башкирия / Bashkortostan	61,4	21,2	10,2	2,7
Свердловская / Sverdlovskaya	56,7	32,2	9,7	14,2
Восточно-Казахстанская East Kazakhstanskaya	2,7	2	0,8	7,4
Алтай / Altai	68,7	36,48	12,6	13,1
Хакасия / Khakassia	56	37,7	14,4	13,1
Красноярский / Krasnoyarsky	79,2	51,37	32,8	13,9
Иркутская / Irkutskaya	61,6	34,1	10,95	12,9
Бурятия / Buryatia	45,3	44,4	12,7	16,2
Забайкальский / Zabaikalsky	57,1	29,7	9,9	14,6
Амурская / Amurskaya	61,2	28,6	14,7	15,3
Хабаровский / Khabarovsky	36,9	10,9	2,3	8,2

Таблица 3 / Table 3

Показатели выживаемости и роста климатипов лиственницы в единицах их стандартного отклонения
Survival and growth rates of larch climatetypes in units of their standard deviation

Край, область, республика Territory, region, republic	Лесхоз Forestry	Выживаемость Survival	Диаметр Diameter	Высота Height	Среднее стандартное отклонение Mean standard deviation
Ивановская / Ivanovskaya	Воляжский / Volzhsky	-5,70	-5,40	-2,20	-4,43
Башкортостан Bashkortostan	Учалинский / Uchalinsky	-4,10	3,00	0,20	-0,30
Свердловская Sverdlovskaya	Ивдельский / Ivdelsky	2,20	-0,80	1,50	0,97
	Егоршинский / Egorshinsky	4,40	6,60	1,50	4,17
	Новолялинский / Novolyalinsky	1,40	-2,50	0,20	-0,30
Восточно-Казахстанская East Kazakhstanskaya	Маркакольский / Markakolsky	-5,70	-5,20	0,20	-3,57
	Курчумский / Kurchumsky	-5,70	-5,40	-2,20	-4,43
Алтай / Altai	Чемальский / Chemalsky	1,10	2,10	-0,10	1,03
Хакасия / Khakassia	Октябрьский / Oktyabrsky	-0,20	1,40	0,80	0,67
	Бирикчүльский / Birikchul'sky	4,40	4,10	1,30	3,27
Красноярский Krasnoyarsky	Верхне-Манский Upper-Mansky	3,10	9,30	1,70	4,70
Иркутская / Irkutskaya	Качугский / Kachugsky	-0,20	1,00	-0,20	0,20
	Вихоревский / Vikhorevsky	-4,00	-1,40	0,30	-1,70
Бурятия / Buryatia	Закаменский / Zakamensky	5,50	3,20	0,20	2,97
Забайкальский Zabaikalsky	Могочинский / Mogocha	0,10	2,30	0,70	1,03
	Читинский / Chitinsky	2,10	-1,70	0,00	0,13
	Петровск-Забайкальский Petrovsk-Zabaykal'sky	5,10	1,20	0,90	2,40
Амурская / Amurskaya	Свободненский / Svobodnensky	0,80	5,10	-0,20	1,90
Хабаровский Khabarovsky	Амгунский / Amgunsky	-2,80	-4,70	-1,50	-3,00
	Охотский / Okhotsky	-5,70	-5,40	-2,20	-4,43

Небольшое увеличение числа лучших климатипов по диаметру (на основании результатов стандартного отклонения) связано со снижением густоты стояния деревьев, которая имеет обратное отношение к среднему диаметру потомства, т. е. чем больше численность, тем меньше диаметр. Отклонения показателя были небольшими (лежали в пределах 2–3 σ). Фенотипическая изменчивость потомств в коллекции по высоте была более надёжнее, чем по диаметру. Стандартные отклонения лежали в пределах 1–2 σ . Это говорит о том, что рост в высоту является наследственно обусловленным показателем. Потомства сохраняют свой характерный линейный рост даже в стрессовых условиях. В целом, отмечается определённая закономерность: чем генетически разнообразнее потомство, тем шире границы его адаптационных возможностей.

Заключение

Таким образом, каждое потомство «перемещаемых» популяций имеет свои характерные особенности, которые определяются не только географическим положением «материнских» насаждений, но и генотипическим разнообразием самих популяций, видом древесной породы. Наиболее адаптированные к стрессовым условиям произрастания климатипы, имеющие генетически разнообразное потомство, выживают в первом и переходят во второе и последующие десятилетия с момента посадки. Это отражается на показателях роста потомства. В это время всё большее значение обретает влияние особей в популяциях друг на друга и наследственные задатки. Лучшими потомствами из коллекции ГКЛ оказались: лиственница Сукачёва из Свердловской области (ивдельская и егоршинская популяции); лиственница сибирская из Алтая, Хакасии (октябрьская и бирикчульская популяции), Красноярского края, Иркутской области (качугская популяция) и Бурятии; лиственница Гмелина из Забайкальского края и Амурской области; лиственница Чекановского из Забайкальского края. Из них слабо реагируют на изменения условий среды лиственница Сукачёва из Свердловской области, лиственница сибирская из Алтая, Хакасии, лиственница Гмелина из Забайкальского края и Амурской области; лиственница Чекановского из Забайкальского края.

References

1. Zamolodchikov D.G. Forecast of global temperature growth in the xxi century on the basis of a simple statistical

model // Forecasting the global temperature increase for the XXI century by means of a simple statistical model // *Kompyuternyye issledovaniya i modelirovaniye*. 2016. V. 8. No. 2. P. 379–390. doi: 10.20537/2076-7633-2016-8-2-379-390

2. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Isaev A.S. Unconsidered sporadic sources of carbon dioxide emission from soils in taiga forests // *Doklady Biological Sciences*. 2017. V. 475. P. 165–168. doi: 10.1134/S0012496617040093

3. Aleksandrov A., Pandeva D. European forest genetic resources, their protection and use // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 1. P. 80–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-1-080-84

4. Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Lipka O.N. Projection of carbon sequestration in riparian reforestation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 95–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-095-101

5. Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Article No. D05101. doi: 10.1029/2003JD004245

6. Bhatt U.S., Walker D.A., Reynolds M.K., Comiso J.C., Epstein H.E., Jia G., Gens R., Pinzon J.E., Tucker C.J., Tweedie C.E. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea-ice decline // *Earth Interact.* 2010. V. 14. No. 8. P. 1–20. doi: 10.1175/2010EI315.1

7. Demina N.A., Fayzulin D.H., Nakvasina E.N. Clarification of the boundaries of forest seed zoning of spruce in the European North // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoy vestnik*. 2013. No. 2 (94). P. 23–28 (in Russian).

8. Shutyaev A.M., Gertych M. Height growth variation in a comprehensive Eurasian provenance experiment of (*Pinus sylvestris* L.) // *Silvae Genetica*. 1997. V. 46. No. 6. P. 332–349 (in Russian).

9. Galdina T.E., Romanova M.M., Sitnikov K.S. Geographic cultures – a tool of biodiversity conservation of Scots pine in the Central forest-steppe // *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2012. No. 1. P. 407–411 (in Russian).

10. Kabanova S.A., Danchenko A.M., Danchenko M.A. Geographical cultures of silver birch and Siberian larch in Northern Kazakhstan // *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy*. 2017. V. 20. P. 55–58 (in Russian).

11. Melnik P.G., Merzlenko M.D., Lobova S.L. The result of growing climatotypes of larch in geographical cultures of the North-East of the Moscow region // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No. 2 (136). P. 62–67 (in Russian).

12. Moiseeva I.C. Status growth and security of climatotypes of Scots pine in the geographic cultures of Krasnoyarsky forestry of the Samara region // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 1 (54). P. 17–19 (in Russian).

13. Nakvasina E.N., Demina N.A., Prozhnerina N.A. Evaluation of survival and growth of *Picea abies* (L.)

H. Karst. and *Picea obovata* Ledeb. Provenances in the north of Russia // Journal of Forest Science. 2017. V. 63. No. 9. P. 401–407. doi: 10.17221/74/2017-jfs

14. Nikolaeva M.A., Krastanov A.A., Kamalov D.E., Maleev O.A. Ispolzovanie geographical variation in the breeding of conifers in the Republic of Bashkortostan // Khvoynnye borealnoy zony. 2015. V. 33. No. 1–2. P. 30–37 (in Russian).

15. Suvanto S., Nöjd P., Henttonen H.M., Beuker E., Mäkinen H. Geographic patterns in the radial growth response of Norway spruce provenances to climatic variation // Agricultural and Forest Meteorology. 2016. No. 222. P. 10–20. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.03.003

16. Andreassen K., Solberg S., Tveito O.E., Lystad S.L. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) growth in Norway // Forest Ecology and Management. 2006. No. 222. P. 211–221.

17. Beuker E., Koski V. Adaptation of tree populations to climate as Reflected by ages provenance tests // Caring for the Forest: Research in a Changing World.

Poster Abstracts. IUFRO XX World Congress. Tampere, Finland. 1995. 248 p.

18. Deynega E.A., Savvateeva O.A. Express control of anthropogenic transformation of urban ecosystems by methods of bioindication of coniferous species // Fundamentalnyye issledovaniya. 2012. No. 5. P. 407–411 (in Russian).

19. Pardaev E.Yu., Mashkina O.S., Kuznetsova N.F. The condition of the generative sphere of the pine needles as a bioindicator of forest sustainability in the Central Chernozemnoy district in connection with global climate change // Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva. 2013. No. 2. P. 16–21 (in Russian).

20. Bobrinev V.P., Pak L.N. Forest stationary researches in Zabaykalsky Krai. Chita: Poisk, 2011. 492 p. (in Russian).

21. Study of existing and creation of new geographical cultures: program and methods of work. Pushkino: VNIILM, 1972. 52 p. (in Russian).

Восстановление сосняков лишайниковых на карьерах среднетаёжной подзоны Северо-Востока европейской части России

© 2021. И. А. Лиханова¹, к. б. н., н. с., Т. Н. Пыстина¹, к. б. н., с. н. с., Г. С. Шущпанникова², к. б. н., доцент, Г. В. Железнова¹, д. б. н., в. н. с.,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,

167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Проведено изучение динамики растительных сообществ в ходе восстановления сосняков лишайниковых на песчаных карьерах среднетаёжной подзоны Северо-Востока европейской части России. Из-за неблагоприятных свойств субстрата формирование соснового древостоя происходит медленно, что приводит к его разновозрастности. Отмечены три стадии первичного сукцессионного ряда сосняков лишайниковых: 1 стадия закрепления субстрата за счёт роста пионерных мхов (стадия *Polytrichum piliferum*, возраст сукцессии 8–19 лет); 2 стадия возобновляющихся сосняков с напочвенным покровом из пионерных бокальчатых и шиловидных лишайников рода *Cladonia* (стадия *Cladonia verticillata* и *C. subulata*, 26–38 лет); 3 стадия молодняков сосны с доминированием в напочвенном покрове кустистого лишайника *C. mitis* (стадия *Cladonia mitis*, 45–55 лет). В лишайниковом покрове средневозрастных сосняков преобладают *C. arbuscula*, *C. rangiferina*, *C. stellaris*; в спелых – *C. stellaris*. На основе анализа динамики видового состава сообществ и встречаемости видов в сукцессионном ряду сосняков лишайниковых предлагается выделить новую ассоциацию *Polytricho piliferi–Pinetum sylvestris*, характеризующую слабосомкнутые возобновляющиеся сосняки с преобладанием в напочвенном покрове пионерных мхов и лишайников.

Ключевые слова: средняя тайга, сосняки лишайниковые, песчаные карьеры, сукцессия.

Reforestation of lichen pine forests at the open pits in the middle taiga of the North-East of European part of Russia

© 2021. I. A. Likhanova ORCID: 0000-0001-8781-4768¹, T. N. Pystina ORCID: 0000-0003-2215-4724¹, G. S. Shushpannikova ORCID: 0000-0003-0421-3452², G. V. Zheleznova ORCID: 0000-0002-8208-0838¹

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

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

²Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,

55, Oktyabrskij St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167001,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

In the subzone of the middle taiga of the North-East of European part of Russia, plant communities of sand pits with different durations of primary succession (8–19, 26–38, 45–55 years), as well as lichen pine forests in the territories adjacent to the pits, were studied. 55 geobotanical descriptions were completed and analyzed on sites of 100 m². The objects of study are located on the pine forest terraces of the Vychegda River with powerful ancient alluvial sands. It was revealed that the tree stand of pits is formed by pine. Due to the adverse properties of the sandy substrate, the process of introducing pine into the territory of the quarries is slowed down, which leads to an age difference of the stand. During the development of ground cover, a regular change in dominants occurs. At a 8–19-year pit, the substrate is fixed thanks to pioneer mosses (stage *Polytrichum piliferum*); at the age of 26–38, pioneer mosses co-dominate with primary horn-shaped and styloid lichens (stage *Cladonia verticillata* and *C. subulata*); on the 45–55-year-old, bushy lichens begin to dominate (*Cladonia mitis* stage). *C. arbuscula*, *C. rangiferina*, *C. stellaris* co-dominate in the lichen cover of middle-aged pine trees surrounding quarries. In ripe lichen pines *C. stellaris* dominates. Based on the analysis of the species composition of the communities and the occurrence of species in the succession series of lichen pine forests, a new association *Polytricho*

piliferi – *Pinetum sylvestris* was identified, which characterizes weakly closed communities of young pine forests with a predominance of pioneer mosses and lichens in the ground cover. *Ceratodon purpureus*, *Cladonia gracilis* subsp. *turbinata*, *C. fimbriata*, *C. subulata*, *C. verticillata*, *Niphotrichum canescens*, *Peltigera malacea*, *Polytrichum piliferum*, *Salix acutifolia*, *Stereocaulon tomentosum* are diagnostic species.

Keywords: middle taiga, lichen pine forests, sand pits, succession.

Добыча минеральных и топливно-энергетических ресурсов в таёжной зоне сопровождается уничтожением лесов и формированием растительности техногенных местообитаний. Сукцессионные ряды восстановления растительности после антропогенных нарушений изучены недостаточно, в том числе сукцессионный ряд сосняков лишайниковых. Сосняки лишайниковые приурочены к самым сухим и бедным почвам. Возможность существования данных сообществ связана с эффективным использованием ресурсов среды слагающих их видов [1]. Анализ данных литературы показывает, что внимание исследователей направлено больше на изучение вторичных сукцессий восстановления сосняков лишайниковых, в том числе послепожарных [2–6], чем первичных.

Цель данной работы – выявить закономерности динамики растительных сообществ в ходе восстановления сосняков лишайниковых на песчаных карьерах среднетаёжной подзоны Северо-Востока европейской части России.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились в Ленском районе Архангельской области и Сыктывдинском районе Республики Коми. По ботанико-географическому районированию [7] район исследований расположен в полосе среднетаёжных лесов Кольско-Печорской подпровинции Североевропейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойнолесной) области. Обширные массивы сосновых лесов покрывают древнеаллювиальные террасы крупных рек и их притоков, конечные песчаные морены и заболоченные междуречья.

Изучена растительность песчаных (содержание физической глины 3–6%) карьеров – № 3 (62°05'26" с. ш., 48°43'56" в. д., площадь 4 га) и № 6 (61°57'35" с. ш., 50°36'22" в. д., 8 га), а также сосняков лишайниковых на прилегающих к карьерам ненарушенных территориях. Объекты исследования расположены на борových террасах р. Вычегды, характеризующихся мощными древнеаллювиальными песками. Разработка и основная добыча грунта проводилась в карьере № 6

в 1960-х гг., в карьере № 3 – в начале 1980-х гг. Постепенно объёмы добычи падали, и карьеры были оставлены на самозарастание (№ 6 – в 1970-х гг., № 3 – в начале 1990-х гг.).

Исследования растительности проводили в 2000–2019 гг. Проанализировано 55 геоботанических описаний. Площадь описаний 100 м². Определены количество деревьев на площадках, их возраст, высота, диаметр [8]. Выявлен видовой состав и обилие сосудистых растений, мхов и напочвенных лишайников. При статистической обработке данных использован регрессионный анализ. Ординация сообществ выполнена с помощью метода неметрического многомерного шкалирования – NMS в программе ExcelToR. Классификация растительности проведена по методу Браун-Бланке [9]. Образцы мхов и лишайников хранятся в УНУ «Научный гербарий Института биологии Коми НЦ УрО РАН (SYKO)».

Результаты и обсуждение

В ходе открытой добычи карьерного песка полностью уничтожается почвенный и растительный покровы. Песчаный субстрат подвергается ветровой и водной эрозии. Освещённость поверхности увеличивается. Колебания влажности и температуры грунта становятся экстремальными.

В первом-втором десятилетиях сукцессии (карьер № 3, геоботанические описания 2000 г.) начинает возобновляться сосновый древостой. Высота сосны (*Pinus sylvestris*) – 0,6 м, густота – 1,1 тыс. шт./га. Медленное внедрение и рост сосны обусловлены неблагоприятными гидро-термическими условиями песчаного субстрата. Разреженный кустарниковый ярус представлен *Salix acutifolia*. Травяно-кустарниковый покров не развит, отмечаются единичные экземпляры *Festuca ovina*, *Chamaenerion angustifolium*. Песчаный субстрат постепенно закрепляется за счёт роста пионерных мхов (*Polytrichum piliferum*, *Ceratodon purpureus*). Из лишайников первыми появляются виды рода *Peltigera*, *Stereocaulon*, автотрофный компонент которых представлен цианобактериями, а также виды рода *Cladonia*. По преобладающему виду в напочвенном покрове

стадия закрепления песчаного субстрата названа стадией *Polytrichum piliferum*.

В третьем-четвертом десятилетиях сукцессии (карьер № 3, геоботанические описания 2018 и 2019 гг.) общее количество сосны достигает 1,85 тыс. шт./га. В среднем высота древостоя – 4 м, диаметр – 4,8 см, возраст – 26 лет. Сомкнутость крон составляет 0,1–0,3. Разреженный кустарниковый ярус формирует *Salix acutifolia*. Травяно-кустарничковый ярус характеризуется увеличением видового разнообразия. Проективное покрытие (ПП) его незначительно (не более 10%). С высоким постоянством отмечены ксерофильные (*Antennaria dioica*, *Calamagrostis epigeios*, *Carex ericetorum*, *Pilosella officinarum*) и характерные для техногенных местообитаний (*Agrostis tenuis*, *Chamaenerion angustifolium*, *Hieracium umbellatum*) виды. В напочвенном покрове (ПП 20–80%) пионерные мхи (*Polytrichum piliferum*) содоминируют с пионерными шиловидными и бокальчатыми лишайниками, адаптированными к резким колебаниям влажности (*Cladonia subulata*, *C. verticillata* и *C. gracilis* ssp. *turbinata*). Отмечены пятна лишайников родов *Peltigera*, *Stereocaulon*. На поверхности почвы характерны корочки, состоящие из грибов, цианобактерий, водорослей и протонемы мхов. Появляются кустистые лишайники, среди которых наиболее обильны *Cladonia mitis* и *C. uncialis*. По характерным видам данная стадия названа стадией *Cladonia verticillata* и *C. subulata*. За счёт формирования растительного сообщества песчаный субстрат закреплён и экологические условия становятся более стабильными.

В пятом-шестом десятилетиях сукцессии (карьер № 6, геоботанические описания 2018 и 2019 гг.) общее количество сосны достигает 2,4 тыс. шт./га. В среднем высота древостоя – 4,7 м, диаметр – 6,4 см, возраст – 34 года. Сомкнутость крон – до 0,3. Изменения в слабо выраженных кустарниковом и травяно-кустарничковом ярусах, по сравнению ранее описанными сообществами стадии *Cladonia verticillata* и *C. subulata*, незначительны. Наиболее существенные различия между сообществами карьеров третьего-четвертого и пятого-шестого десятилетий сукцессии отмечены в структуре напочвенного покрова. Проективное покрытие пионерных видов мхов, шиловидных и бокальчатых лишайников снижается, напочвенный покров становится более однородным, в нем явно доминирует кустистый лишайник *C. mitis*, характерный для слабосомкнутых древостоев (стадия *Cladonia mitis*).

На прилегающих к карьере территориях со средневозрастными сосняками лишайниковыми (средний возраст древостоя 60 лет, максимальный 120) общее количество сосны составляет 3,1 тыс. шт./га. Средняя высота древостоя – 12 м диаметр – 14 см. Сомкнутость крон – 0,3–0,6. Подлесок не развит. В травяно-кустарничковом ярусе (ПП 1–50%) высокое постоянство имеет *Vaccinium vitis-idaea*. Лишайниковый покров сплошной, в нём содоминируют кустистые лишайники *Cladonia arbuscula*, *C. rangiferina*, *C. stellaris*, более толерантные к тени, чем *C. mitis*.

В спелых сосняках лишайниковых (средний возраст древостоя 90–100 лет, максимальный 180) общее количество сосны – 1,6 тыс. шт./га. Средняя высота древостоя – 17 м, средний диаметр – 22 см. Сомкнутость крон – 0,3–0,6. Подлесок не развит. Травяно-кустарничковый ярус либо развит слабо, либо представлен *Vaccinium vitis-idaea*. Абсолютный доминант в напочвенном покрове – *Cladonia stellaris*. Среди мхов с высоким постоянством отмечены *Pleurozium schreberi* и *Dicranum polysetum*.

Таким образом, начальные стадии возобновления древостоя на карьерах характеризуются медленным внедрением сосны и увеличением её биометрических показателей (рис. 1). В средневозрастных сосняках лишайниковых (средний возраст древостоя 60 лет) отмечено большее количество деревьев, чем в молодняках на карьерах. В спелых сосняках (возраст древостоя 90–100 лет) параметр снижается в связи с дифференциацией древостоя, подтверждающейся максимальными значениями высоты и диаметра.

Для возобновляющихся древостоев сообществ карьеров, как и древостоев спелых сосняков лишайниковых, характерна разновозрастность (рис. 2). Что, по-видимому, связано с медленным внедрением и значительной гибелью сосны из-за неблагоприятных свойств песчаного субстрата.

В ходе сукцессии на карьерах происходит увеличение видовой насыщенности сообществ: в 8–19-летних сообществах в среднем отмечено 15 ± 1 видов/100 м²; 26–28-летних – 34 ± 2 ; 45–55-летних – 37 ± 2 . В средневозрастных сосняках лишайниковых окрестностей карьеров отмечено 29 ± 2 видов/100 м², в спелых – 27 ± 1 .

Анализ встречаемости видов в исследуемых сообществах позволил выделить три группы растений. I группа включает пионерные виды сосудистых растений (*Chamaenerion*

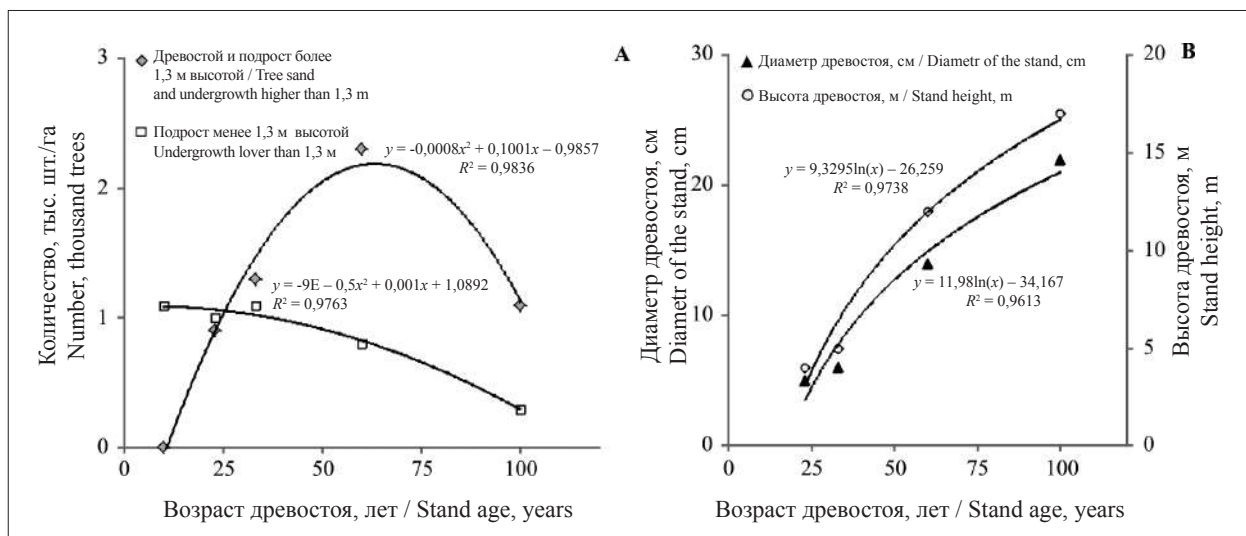


Рис. 1. Количество (А) и биометрические показатели (В) сосны в зависимости от возраста древостоя
Fig. 1. The number (А) and biometric indications (В) of pine, depending on the age of the stand

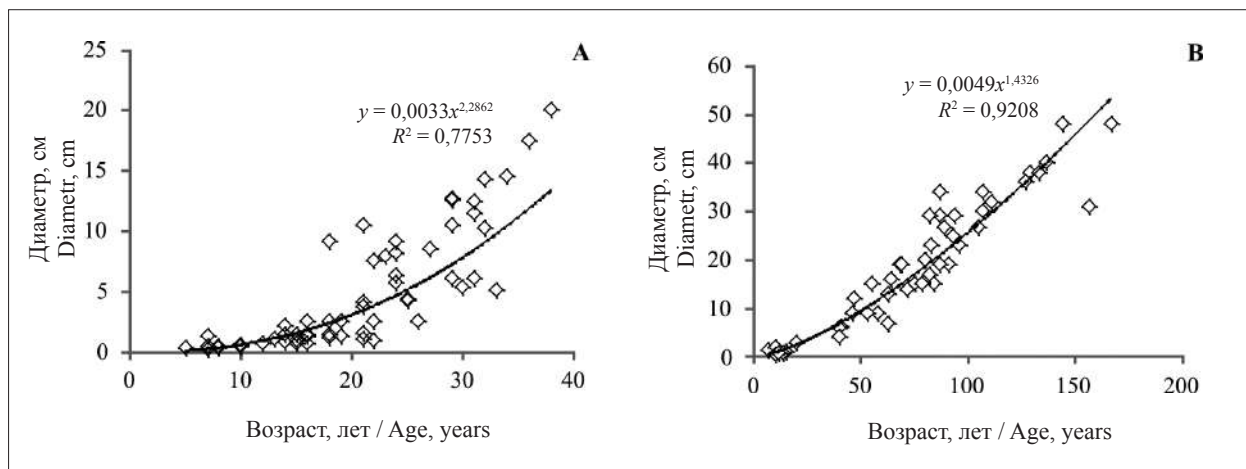


Рис. 2. Возрастная структура сосны: А – в 26–38-летних сообществах карьера № 3;
 В – в спелом сосняке лишайниковом
Fig. 2. Age structure of pine: А – in 26–38-year-old communities of the quarry No. 3;
 В – in a ripe pine lichen forest

angustifolium, *Hieracium umbellatum*, *Salix acutifolia*) и мхов (*Ceratodon purpureus*, *Niphotrichum canescens*, *Polytrichum piliferum*), снижающие свою встречаемость в ходе первичной сукцессии на территории карьеров и практически отсутствующие в зрелых сосняках лишайниковых. Виды II группы во временной промежуток первичной сукцессии 0–55 лет увеличивают встречаемость, а в средневозрастных и спелых сосняках – уменьшают. Среди них сосудистые виды растений (*Agrostis tenuis*, *Antennaria dioica*, *Arctostaphylos uva-ursi*, *Calamagrostis epigeios*, *Carex ericetorum*, *Erigeron acris*, *Festuca ovina*, *Luzula multiflora*, *Pilosella officinarum*, *Solidago*

virgaurea и др.), лишайники (*Cladonia coccifera* group, *C. crispata*, *C. fimbriata*, *C. gracilis* subsp. *turbinata*, *C. mitis*, *C. subulata*, *C. sulphurina*, *C. verticillata*, *Peltigera malacea*, *Stereocaulon tomentosum*, *Trapeliopsis granulosa* и др.). Виды III группы характеризуются максимальной встречаемостью в сообществах сосняков лишайниковых окрестностей карьеров (*Cetraria islandica*, *Cladonia arbuscula*, *C. stellaris*, *Dicranum fuscescens*, *D. polysetum*, *D. scoparium*, *Pleurozium schreberi*, *Vaccinium vitis-idaea* и др.). По-видимому, для их успешного роста необходима лесная среда.

Северо-Европейские сосновые леса с преобладанием лишайников в напочвенном по-

кроме включены в субассоциацию *typicum* ассоциации *Cladonio arbusculae–Pinetum sylvestris* (Kielland-Lund 1967) Ermakov et Morozova 2011 союза *Cladonio stellaris–Pinion sylvestris* Kielland-Lund ex Ermakov et Morozova 2011 порядка *Pinetalia sylvestris* Oberdorfer 1957 класса *Vaccinio – Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 [10–12]. Учитывая существенную разницу между сформированными сосняками лишайниковыми и возобновляющимися сосняками на территории карьеров, подтверждающуюся NMS-ординацией (рис. 3), предлагаем первые включить в субассоциацию *Cladonio arbusculae–Pinetum sylvestris typicum*, вторые – в новую ассоциацию *Polytrichum piliferi–Pinetum sylvestris*, с диагностирующими видами *Ceratodon purpureus*, *Cladonia gracilis* subsp. *turbinata*, *C. fimbriata*, *C. subulata*, *C. verticillata*, *Niphotrichum canescens*, *Peltigera malacea*, *Polytrichum piliferum*, *Salix acutifolia*, *Stereocaulon tomentosum*.

Заключение

Формирование соснового древостоя в ходе первичных антропогенных сукцессий в средне-таёжной подзоне Северо-Востока европейской

части России происходит медленно из-за неблагоприятных свойств песчаного субстрата, что приводит к разновозрастности древостоя. В первые два десятилетия сукцессии формирование напочвенного покрова происходит в основном за счёт раннесукцессионных мхов, в последующем уже – лишайников. В ходе сукцессии пионерные бокальчатые и шиловидные лишайники рода *Cladonia* (*C. verticillata*, *C. subulata*, *C. gracilis* subsp. *turbinata* и др.) сменяются на кустистые (*C. mitis* и *C. uncialis*), появляются *C. arbuscula*, *C. rangiferina* и поздне-сукцессионный вид *C. stellaris*, за счёт которых сформирован лишайниковый покров средневозрастных и спелых сосняков лишайниковых. Отмечены три стадии первичного сукцессионного ряда сосняков лишайниковых: 1 стадия *Polytrichum piliferum* (8–19 лет); 2 стадия *Cladonia verticillata* и *C. subulata* (26–38 лет); 3 стадия *Cladonia mitis* (45–55 лет). На основе анализа видового состава сообществ и встречаемости видов в сукцессионном ряду предлагается выделить новую ассоциацию *Polytrichum piliferi–Pinetum sylvestris*, характеризующую слабосомкнутые сообщества возобновляющихся сосняков с преобладанием в напочвенном покрове пионерных мхов и лишайников.

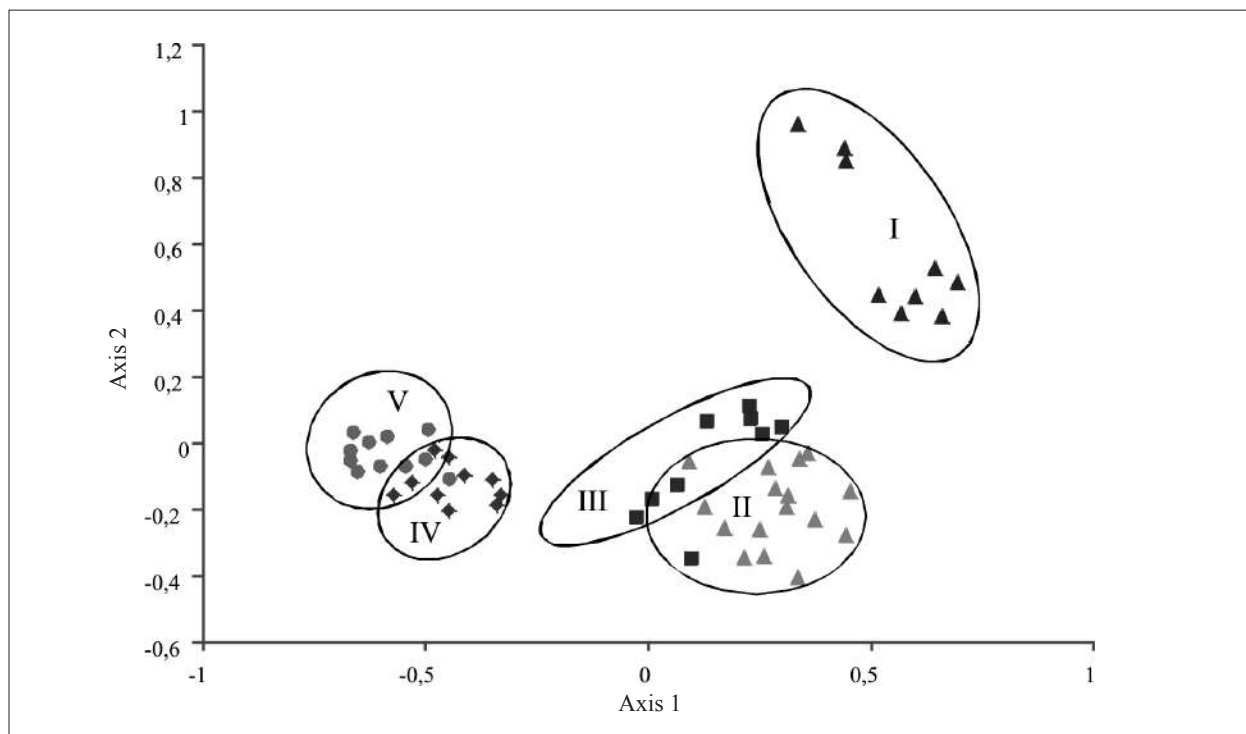


Рис. 3. NMS – ординация сообществ карьеров и прилегающих в них территорий: I – 8–19-летние сообщества карьеров, II – 26–38-летние сообщества карьеров, III – 45–55-летние сообщества карьеров, IV – средневозрастные сосняки лишайниковые, V – спелые сосняки лишайниковые
Fig. 3. NMS – ordination of quarry communities and adjacent territories: I – 8–19-year quarry communities, II – 26–38-year-old quarry communities, III – 45–55-year-old quarry communities, IV – middle-aged lichen pine forests, V – ripe lichen pine forests

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ Коми НЦ УрО РАН (номера гос. регистрации: АААА-А17-117122290011-5 и АААА-А19-119011790022-1).

Большую помощь в проведении полевых исследований оказали А. В. Лиханов, Н. А. Кодорова, В. Б. Кожевников, Д. С. Терентьев, Ю. В. Холопов, О. А. Останина.

References

1. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Pystina T.N. Ecological and biological, and functional traits of lichens in Taiga zone of European Northeast of Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 6–13 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-006-013
2. Johnson E.A. Vegetation organization and dynamics of lichen woodland communities in the Northwest Territories Canada // Ecology. 1981. V. 62. No. 1. P. 200–215. doi: 10.2307/1936682
3. Foster D.R. Vegetation development following fire in *Picea mariana* (Black Spruce) – Pleurozium forests of south-eastern Labrador, Canada // J. Ecol. 1985. V. 73. P. 517–534. doi: 10.2307/2260491
4. Ahti T., Oksanen J. Epigeic lichen communities of taiga and tundra regions // Vegetatio. 1990. V. 86. P. 39–70. doi: 10.1007/BF00045134
5. Gorshkov V.V. Characteristics of restoration of forest ecosystems after fires // Doklady AN Rossii. 1993. V. 333. No. 6. P. 111–114 (in Russian).
6. Gorshkov V.V., Bakkal I.Ju. Features of postfire recovery dynamics of communities with domination of lichens // Izvestiya Samarskogo NTs RAN. 2012. V. 14. No. 1 (5). P. 1223–1227 (in Russian).
7. Vegetation of the European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).
8. Methods of studying forest communities. Sankt-Petersburg: NIИhimii SPbGU, 2002. 240 p. (in Russian).
9. Braun-Blanquet J. Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Aufl. Wien; New York, 1964. 865 p. doi: 10.1007/978-3-7091-8110-2
10. Kielland-Lund J. Die Waldgesellschaften SO Norwegens // Phytocoenologia. 1981. V. 9. No. 1/2. P. 53–250. doi: 10.1127/phyto/9/1981/53
11. Ermakov N., Morozova O. Syntaxonomical survey of boreal oligotrophic pine forests in northern Europe and Western Siberia // Appl. Veg. Sci. 2011. V. 14. P. 524–536. doi: 10.1111/j.1654-109X.2011.01155.x
12. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K., Theurillat J.-P., Raus T., Čarni A., Šumberová K., Willner W., Dengler J., García R.G., Chytrý M., Hájek M., Di Pietro R., Iakushenko D., Pallas J., Daniëls F.J.A., Bergmeier E., Santos Guerra A., Ermakov N., Valachovič M., Schaminée J.H.J., Lysenko T., Didukh Y.P., Pignatti S., Rodwell J.S., Capelo J., Weber H.E., Solomeshch A., Dimopoulos P., Aguiar C., Hennekens S.M., Tichý L. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities // Applied Vegetation Science. 2016. V. 19. Suppl. 1. P. 3–264. doi: 10.1111/avsc.12257

Расчёт максимальной продуктивности *Dunaliella salina* Teod. в условиях естественного освещения

© 2021. А. С. Лелеков, к. б. н., с. н. с.,
А. Б. Боровков, к. б. н., в. н. с., И. Н. Гудвилевич, к. б. н., с. н. с.,
Т. М. Новикова, м. н. с., А. Л. Авсиян, м. н. с.,
О. А. Меметшаева, вед. инженер, Р. П. Тренкеншу, к. б. н., в. н. с.,
ФИЦ Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН,
299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,
e-mail: a.lelekov@yandex.ru, nowtanj@yandex.ru

Работа посвящена расчёту максимальной наблюдаемой скорости роста зелёной галофильной микроводоросли *Dunaliella salina* в условиях естественного освещения южных регионов России (на примере г. Севастополя). Наблюдаемая скорость роста *D. salina* определялась как разность между валовой продуктивностью и скоростью эндогенного расхода биомассы. Валовая продуктивность определяется притоком энергии фотосинтетически активной радиации, коэффициентом поглощения, а также эффективностью (КПД) её утилизации. При расчёте валовой продуктивности предполагалось, что вся падающая на поверхность бассейна световая энергия поглощается культурой микроводорослей. Средняя величина КПД за световой день составила 5,58%. Скорость эндогенного расхода биомассы определяли исходя из величины ночных потерь, которые для *D. salina* составили около 5%. Показано, что максимальная наблюдаемая продуктивность культуры *D. salina* в условиях естественного освещения южных регионов России не может превышать 26 г СВ/(м²·сут).

Ключевые слова: *Dunaliella salina*, естественное освещение, КПД фотобиосинтеза, продуктивность, моделирование.

Estimation of *Dunaliella salina* Teod. maximum productivity under natural illumination

© 2021. A. S. Lelekov ORCID: 0000-0003-1213-7963, A. B. Borovkov ORCID: 0000-0001-6612-491X,
I. N. Gudvilovich ORCID: 0000-0001-7412-8283, T. M. Novikova ORCID: 0000-0002-6366-6470,
A. L. Avsiyan ORCID: 0000-0002-2828-9614, O. A. Memetshaeva ORCID: 0000-0003-3773-7703,
R. P. Trenkenshu ORCID: 0000-0003-3727-303X,
A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
2, Nakhimova Av., Sevastopol, Russia, 299011,
e-mail: a.lelekov@yandex.ru, nowtanj@yandex.ru

The research deals with theoretical calculation of the maximal growth rate of green halophilic microalga *Dunaliella salina* in the conditions of natural illumination at South regions of Russia (Sevastopol city as an example). The calculation is based on the concept that microalgae growth rate is defined as the difference between gross productivity and endogenous biomass expenditure rate. Gross productivity is a function of photosynthetic active radiation (PAR), absorption coefficient and energy utilization efficiency. For maximal productivity calculation it is suggested that all incident of the pond surface light energy is absorbed by microalgae culture. As far as photobiosynthesis efficiency value depends on illuminance in a complex way, we used average value 5.58%. The rate of endogenous biomass expenditure was determined based on the value of night losses, which for *D. salina* was about 5%. Computations showed that for *D. salina* maximum biomass gain makes 26 g DW/(m² · day). It is shown that the maximum observed productivity of *D. salina* in the conditions of natural light in the southern regions of Russia cannot exceed 26 g DW/(m² · day).

Keywords: *Dunaliella salina*, natural lighting, efficiency photobiosynthesis, productivity, modeling.

доросли, как правило, выращивают в фотобиореакторах под открытым небом, что обуславливает суточную ритмику роста и биосинтеза. Известно, что при росте микроводорослей в условиях естественного освещения наблюдаются суточные колебания скорости роста культуры и продукции основных биохимических компонентов (белков, жиров, углеводов) [3]. Параметр продуктивности (скорости роста) микроводорослей можно рассматривать как обобщённую характеристику её физиологического состояния, так как он включает в себя всю совокупность биосинтетических и биоконверсионных процессов в клетках [4].

Юг России (Севастополь, Крым, Кавказское побережье) является самым перспективным для промышленного производства биомассы различных видов микроводорослей, так как характеризуется высоким притоком фотосинтетически активной радиации (ФАР) [5]. На сегодняшний день проводятся многочисленные исследования влияния света на первичную продукцию фитопланктона для различных географических широт [6, 7], а также скорость роста культур микроводорослей, выращиваемых в условиях естественного освещения [8, 9]. Разработаны модели, позволяющие количественно описать взаимосвязь продуктивности с облучённостью поверхности бассейнов, температурой, концентрацией основных биогенных элементов, растворённого кислорода [9–12]. Однако верификация разработанных моделей проведена на различных видах микроводорослей и для различных географических широт, поэтому их применение для условий юга России при культивировании *D. salina* затруднительно.

Dunaliella salina культивируется в промышленных масштабах с конца прошлого века. В литературе приводятся немногочисленные данные об её скорости роста в условиях открытых бассейнов. Так, среднегодовая продуктивность *D. salina* составила 1,65 г СВ/(м²·сут), а продукция β-каротина – 0,1 г/(м²·сут) для условий проточной культуры, 10 см глубины бассейна, 0,7–0,9 млн кл./мл [13]. Максимальная продуктивность составила около 3 г СВ/(м²·сут) и продукция β-каротина – 0,3 г/(м²·сут), максимальный приток солнечной радиации в области ФАР составлял около 12 МДж/(м²·сут) в июне месяце в районе юго-западной Испании. По нашим данным [14], продуктивность *D. salina* достигает 3,59 г СВ/(м²·сут) при её выращивании в условиях центрального Крыма. Поэтому возникает вопрос об оценке максимально возмож-

ной, предельной скорости роста *D. salina*, которая ограничена только световыми условиями.

Цель данной работы – расчёт максимальной продуктивности *D. salina* в условиях естественного освещения г. Севастополя.

Объекты и методы исследования

Культура *D. salina* Teod. (штамм IMSS-2 из ЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана» ФИЦ ИнБЮМ) выращивалась в условиях альгобиотехнологического модуля, расположенного на базе Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) г. Севастополя. Бассейны модуля являлись моделью естественных гиперсолёных водоёмов, представляющих интерес для хозяйственного использования [15]. Освещённость и температуру определяли с помощью автоматического датчика [16]. Датчик был откалиброван на стандартный люксметр Ю-116. Культуру *D. salina* выращивали на среде Ven-Amoth [17]. Толщина слоя суспензии составляла 9 см, объём – 65 л, площадь освещаемой поверхности – 0,72 м².

В эксперименте проводили измерение температуры, оптической плотности культуры *D. salina*. Оптическую плотность рассчитывали по формуле:

$$D = -\lg(T), \quad (1)$$

где T – величина пропускания, определяемая на фотометре UNICO-2100 (United Products & Instruments, USA) при длине волны 750 нм, погрешность измерения величины пропускания не превышала 1%. Кюветы располагали максимально близко к фотоприёмнику, что позволяло снизить ошибку измерения оптической плотности культуры, связанную с светорассеянием. При пересчёте единиц оптической плотности на сухую биомассу (СВ) использовали эмпирический коэффициент 0,78 [14].

Результаты и обсуждение

Наблюдаемая скорость роста культуры микроводорослей определяется разностью между валовой продуктивностью и скоростью эндогенного расхода биомассы. Валовая продуктивность P_0 определяется притоком энергии ФАР, коэффициентом поглощения, а также эффективностью её утилизации [4]. Для определения P_0 воспользуемся выражением:

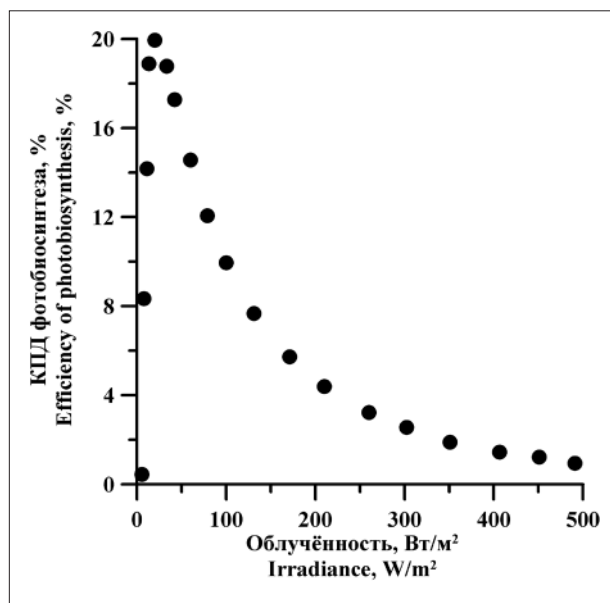


Рис. 1. Зависимость КПД фотобиосинтеза *Platymonas viridis* от облучённости [19]
 Fig. 1. Relationship between photobiosynthesis efficiency *Platymonas viridis* and irradiance [19]

$$P_0 = \eta \cdot \frac{E}{R}, \quad (2)$$

где η – КПД фотобиосинтеза, E – суммарное количество энергии в области ФАР, приходящее на поверхность бассейна, R – калорийность биомассы.

При расчёте будем считать, что вся энергия поглощается суспензией микроводорослей.

Ранее показано, что при плотности культуры, превышающей 0,5 г СВ/л, и глубине бассейна не менее 10 см такое предположение близко к истине [4].

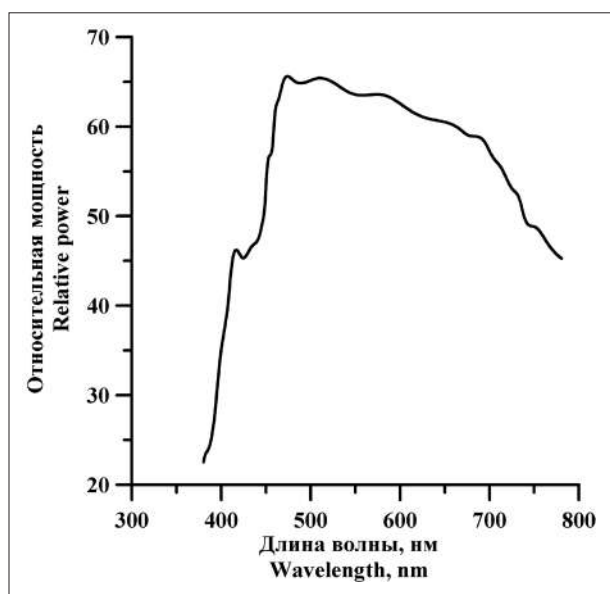
Согласно литературным данным, КПД фотобиосинтеза определяется количеством приходящей световой энергии и имеет сложный характер зависимости от поверхностной облучённости [18, 19]. В современной литературе отсутствуют сведения о КПД фотобиосинтеза культуры *D. salina*. Поэтому для расчётов воспользуемся данными работы [19] для зелёной микроводоросли *Platymonas viridis*, характеризующейся идентичным набором пигментов (рис. 1).

При расчёте валовой продуктивности *D. salina* использовали среднее значение КПД за световой день, которое составило:

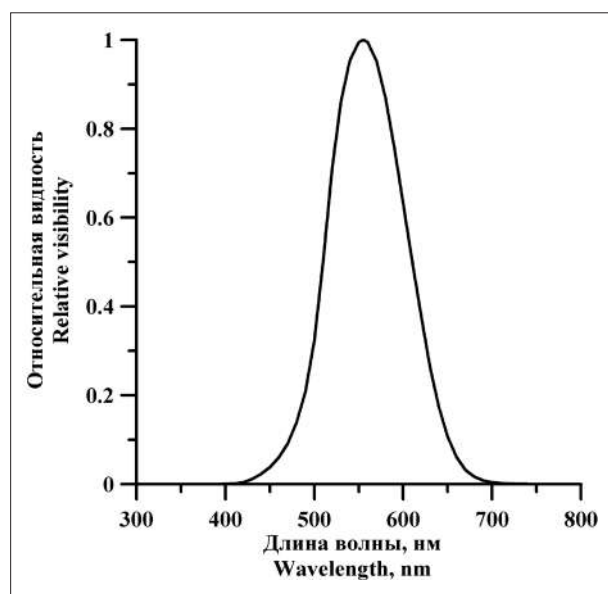
$$\eta = \frac{\int_5^{491} \eta(E)}{491 - 5} \cong 5,58\%.$$

Оценим суммарное количество энергии в области ФАР, попадающее на поверхность бассейна в течение светового дня. Спектральный состав солнечной радиации представлен на рисунке 2 [20]. Для наших условий (г. Севастополь) максимальная высота солнцестояния составляет около 68 градусов 22 июня (день летнего солнцестояния).

Для определения количества полной энергии ФАР, приходящейся на поверхность бас-



A



B

Рис. 2. А – Распределение энергии в солнечном свете в области ФАР в районе г. Севастополя 22.06.2018 г. [20]; В – спектр люксметра
 Fig. 2. A – Solar light energy distribution at PAR range at Sevastopol city region on 22.06.2018 [20]; B – luxmeter spectrum

сейна, необходимо перевести определяемую датчиком [16] освещённость в энергетические единицы облучённости. Для этого используем соотношение [21]:

$$E_0 = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot E_v, \quad (3)$$

где E_0 – облучённость, Вт/м²; E_v – освещённость поверхности, лк; N – отношение величин полной и определяемой люксметром световой энергии.

Для нахождения N вычислим долю энергии δ_i , которая высвечивается на каждой длине волны. Для этого просуммируем все величины относительной мощности излучения, далее для каждой длины волны разделим относительную мощность на полученную сумму. Умножая δ_i соответствующее значение относительной видности, определим количество определяемой люксметром световой энергии. С учётом указанных спектров (рис. 2), величина N составляет 3,04.

Таким образом, при максимальной за световой день освещённости в 85,57 клк на поверхность бассейна падает:

$$E_0 = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 3,04 \cdot 85570 = 380,84 \text{ Вт/м}^2$$

Изменение облучённости в течение суток представлено на рисунке 3. Суммарная энергия, падающая за световой день на поверхность

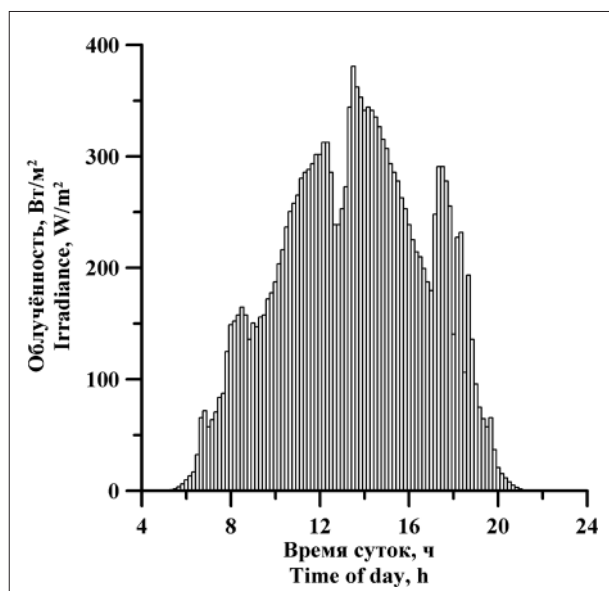


Рис. 3. Зависимость облучённости (Вт/м²) в ФАР диапазоне от времени суток в районе г. Севастополя 22.06.2018 г

Fig. 3. Relationship between the irradiance (W/m²) at PAR range and time of day at Sevastopol city region on 22.06.2018

бассейна, составляет 10,38 МДж/м². Полученное значение примерно на 15% ниже, чем для широты Испании, где максимальный приток солнечной радиации в области ФАР составляет около 12 МДж/м² [13].

Средняя калорийность R 1 г биомассы *D. salina*, как и многих других видов микроводорослей, составляет около 5 ккал или 20,86 кДж [18]. Отметим, что калорийность биомассы определяется её биохимическим составом (соотношением белков, жиров и углеводов), который может варьировать в широких пределах и определяется условиями роста [22]. При дальнейших расчётах будем использовать указанное среднее значение калорийности.

Таким образом, валовая продуктивность *D. salina* для среднего за световой день значения КПД фотобiosинтеза, при её выращивании в бассейне альгобиотехнологического модуля, расположенного на базе ФИЦ ИнБЮМ г. Севастополя, составит:

$$P_0 = 0,558 \cdot \frac{10385,91}{20,86} \cong 27,8 \text{ г СВ/(м}^2 \cdot \text{сут)}.$$

При росте микроводорослей в условиях естественного свето-темнового режима в общем балансе продукции необходимо учитывать ночную потерю биомассы (НПБ), которая происходит за счёт дыхания клеток, а также выделения экзометаболитов в среду [4]. Ночную потерю биомассы (как долю от биомассы в конце светового периода) можно выразить:

$$\text{НПБ} = \frac{B_L - B_D}{B_L} \cdot 100\%,$$

где B_L – плотность культуры в конце предыдущего светового периода (г СВ/л), B_D – плотность биомассы в конце темнового периода (г СВ/л).

В рамках эксперимента по культивированию *D. salina* в условиях естественного светового режима в регионе г. Севастополя было проведено исследование суточной динамики накопления биомассы. Ночная потеря биомассы составила 4,7–5,6% от биомассы как на основании измерений оптической плотности культуры, так и на основании измерений сырого и сухого веса. Таким образом, максимальная наблюдаемая продуктивность *D. salina* составит около 26 г СВ/(м² · сут).

Согласно литературным данным, максимальная продуктивность микроводорослей для условий естественного освещения достигает 21 г СВ/(м² · сут) для *Spirulina platensis* [23].

Для *D. salina* эта величина составляет по разным данным 3–3,5 г СВ/(м²·сут) [13, 14]. Вероятно, снижение продуктивности обусловлено лимитированием её роста биогенными элементами среды. Реализация максимальной возможной скорости роста *D. salina* осуществима только в искусственных условиях биотехнологических комплексов с высоким уровнем обеспеченности минеральным питанием. В условиях естественных водоёмов скорость роста *D. salina* будет значительно ниже.

Заключение

В работе проведён расчёт максимальной наблюдаемой продуктивности микроводоросли *D. salina* для южных регионов России на примере г. Севастополя. В качестве исходных данных для расчёта был выбран спектр солнечной энергии в летний период, суточное изменение освещённости на поверхности бассейна, а также зависимость КПД фотобиосинтеза от облучённости ФАР. На практике при культивировании *D. salina* в естественных условиях продуктивность будет снижаться из-за уменьшения количества приходящей энергии ФАР, из-за облачности, ограничения роста культуры минеральными элементами питательной среды, температурными условиями. Тем не менее, рассчитанная величина максимальной продуктивности близка к экспериментально определённому значению [23]. Следовательно, продуктивность *D. salina* в 26 г СВ/(м²·сут) можно рассматривать как некий ориентир при организации промышленных производств в условиях южных регионов России.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» № гос. регистрации 121030300149-0 (теоретические расчёты) и при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-44-920009 (экспериментальные работы).

References

1. Varfolomeev S.D., Wasserman L.A. Microalgae as source of biofuel, food, fodder, and medicines // Applied Biochemistry and Microbiology. 2011. V. 47. No. 9. P. 789–807. doi: 10.1134/S0003683811090079

2. Shinkarev S.M., Samuylenko A.Ya., Grin S.A., Neminushchaya L.A., Skotnikova T.A., Pavlenko I.V., Kanarskiy A.V. The prospect of the development of microalgae production technology // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. V. 20. No. 14. P. 146–149 (in Russian).

3. Torzillo G., Sacchi A., Materassi R., Richmond A. Effect of temperature on yield and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors // J. Appl. Phycol. 1991. V. 3. P. 95–100. doi: 10.1016/0960-8524(91)90137-9

4. Trenkenshu R.P., Lelekov A.S. Modeling of microalgae growth in culture. Sevastopol: OOO Konstanta-Print, 2017. 152 p. (in Russian). doi: 10.21072/978-5-906952-28-8

5. Guide to the climate of the USSR. Solar radiation, radiation balance and sunshine. Leningrad: Gidrometizdat, 1966. 124 p. (in Russian).

6. Duduina T.V. Primary production of phytoplankton and the community of bottom producers of the South-Eastern Barents Sea in the polar day // Trudy VNIRO. 2014. V. 152. P. 155–168 (in Russian).

7. Egorov V.N., Popovichev V.N., Gulin S.B., Bobko N.I., Rodionova N.Yu., Tsarina T.V., Marchenko Yu.G. Influence of primary production of phytoplankton on the turnover of nutrients in the coastal waters of Sevastopol (Black sea) // Biologiya morya. 2018. V. 44. No. 3. P. 207–214 (in Russian).

8. Yadala S., Cremaschi S. A dynamic optimization model for designing open-channel raceway ponds for batch production of algal biomass // Processes. 2016. V. 4. No. 2. P. 1–31. doi: 10.3390/pr4020010

9. Grobbelaar J.U., Soeder C.J., Stengel E. Modeling algal productivity in large outdoor cultures and waste treatment systems // Biomass. 1990. V. 21. No. 4. P. 297–314. doi: 10.1016/0144-4565(90)90079-Y

10. Hill T.D., Lincoln E.P. Development and validation of a comprehensive model of large-scale production of microalgae // Agricultural Wastes. 1981. V. 4. No. 1. P. 43–64. doi: 10.1016/0141-4607(81)90006-8

11. Sukenik A., Levy R.S., Levy Y., Falkowski P.G., Dubinsky Z. Optimizing algal biomass production in an outdoor pond: a simulation model // J. Appl. Phycol. 1991. V. 3. No. 3. P. 191–201. doi: 10.1007/BF00003577

12. Asmare A.M., Demessie B.A., Murthy G.S. Theoretical estimation the potential of algal biomass for biofuel production and carbon sequestration in Ethiopia // Int. Jour. Renew. Ener. Res. 2013. V. 3. No. 3. P. 560–570.

13. García-González M., Moreno J., Cañavate J.P., Anguis V., Prieto A., Manzano C., Florencio F.J., Guerrero M.G. Conditions for open-air outdoor culture of *Dunaliella salina* in southern Spain // J. Appl. Phycol. 2003. V. 15. P. 177–184. doi: 10.1023/A:1023892520443

14. Trenkenshu R.P., Gevorgiz R.G., Borovkov A.B. Basics of industrial cultivation of *Dunaliella* saltwater (*Dunaliella salina* Teod.). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2005. 103 p. (in Russian).

15. Anufrieva E.V., Shadrin N.V., Shadrina S.N. History of the biodiversity study of Crimea hypersaline waters // *Aridnye ekosistemy*. 2017. V. 4. No. 70. P. 64–71 (in Russian).
16. Chekushkin A.A., Lelekov A.S., Trenkenshu R.P. Simulation of diurnal variation of illuminance in the Sevastopol // *Aktualnye voprosy biologicheskoy khimii i fiziki*. 2018. V. 3. No. 3. P. 547–552 (in Russian).
17. Shaish A., Avron M., Ben-Amotz A. Effect of inhibitors on the formation of stereoisomers in the biosynthesis of β -carotene in *Dunaliella bardawil* // *Plant and Cell Physiology*. 1990. V. 31. No. 5. P. 689–696. doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a077964
18. Belyanin V.N., Sidko F.Ya., Trenkenshu A.P. Energy of photosynthetic microalgae culture. Moskva: Nauka, 1980. 134 p. (in Russian).
19. Terskov I.A., Trenkenshu R.P., Belyanin V.N. Light-dependent growth of *Platymonas viridis* algae in continuous culture // *Izv. SO AN SSSR (Ser. biol.)*. 1979. V. 10. No. 2. P. 103–108 (in Russian).
20. Kleshnin A.F. Plants and light. Moskva: Izd-vo Akademii Nauk SSSR, 1954. 459 p. (in Russian).
21. Ayzenberg Yu.B. The reference book on light engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 472 p. (in Russian).
22. Gatenby C.M., Orcutt D.M., Kreeger D.A., Parker B.C., Jones V.A., Neves R.J. Biochemical composition of three algal species proposed as food for captive freshwater mussels // *J. Appl. Phycol.* 2003. V. 15. P. 1–11. doi: 10.1023/A:1022929423011
23. Benavides A.M.S., Ranglová K., Malapascua J.R., Masojidek J., Torzillo G. Diurnal changes of photosynthesis and growth of *Arthrospira platensis* cultured in a thin-layer cascade and an open pond // *Algal Research*. 2017. V. 28. P. 48–56. doi: 10.1016/j.algal.2017.10.007

Многощетинковые черви (Polychaeta) Печорского моря: биоразнообразие и распределение

© 2021. С. Ю. Гагаев¹, к. б. н., с. н. с.,

С. Г. Денисенко¹, д. б. н., зав. лабораторией,

А. В. Сикорский², к. б. н., ст. консультант,

Н. А. Стрелкова³, к. б. н., в. н. с.,

Е. А. Фролова⁴, к. б. н., с. н. с.,

¹Зоологический институт РАН (ЗИН РАН),

197034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1,

²Акваплан-нива,

9007, Норвегия, г. Тромсё, Хялмар Иогансен, ворота 14,

³Российский федеральный исследовательский институт рыбного хозяйства

и океанографии (ПИНРО),

183038, Россия, г. Мурманск, ул. Академика Книповича, д. 6,

⁴Мурманский морской биологический институт (ММБИ),

Кольский научный центр РАН,

183010, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17,

e-mail: gagaev24@yahoo.com

Исследованы современный таксономический, биогеографический и трофический состав многощетинковых червей, одного из наиболее значимых компонентов донных экосистем Печорского моря, и особенности их качественного и количественного распределения. Этот район Баренцева моря отличается своеобразием абиотических условий, высоким уровнем биологической продуктивности, разнообразием биотопов и многочисленными популяциями редких и охраняемых видов.

По материалам прошлых и новейших экспедиций в Печорском море выявлено 198 таксонов многощетинковых червей, из которых 165 определены до уровня видов, относящихся к 113 родам, 34 семействам и 14 отрядам.

Видовое разнообразие полихет и устойчивость их популяций к стрессу высокое, за исключением небольших районов у выходов из Печорской и Хайбурдской губ с обильным речным стоком. Плотность поселений менялась в широких пределах: от 26 до 7144 инд./м². Изменения численности наиболее сильны в юго-восточной мелководной части Печорского моря и слабее – в северо-западном районе. Пространственное распределение биомассы полихет также неоднородно, но в абсолютных величинах варьирует гораздо меньше: от 0,7 до 387 г/м².

Трофическая структура полихет представлена четырьмя основными группами; более половины суммарной биомассы создают собиратели, несколько менее трети – грунтоеды, фильтраторы – 2%, а хищники «классические» – 10%. Собирающие детритофаги и грунтоеды сосредоточены в основном в районах с глубинами более 25 м, на заиленных грунтах в центральной и северо-западной части моря. Наибольшую долю биоресурсов полихет (80%) составляют 6 видов, из которых наиболее значимы – *Spiochaetopterus typicus* и *Maldane sarsi*.

Соотношение объемов основных биогеографических групп (на основе имеющихся количественных данных с середины XX века) остаётся стабильным, хотя таксономический список постоянно увеличивается. Благополучное состояние таксоцены многощетинковых червей, с учётом их заметной роли в сообществах, предполагает благополучное состояние донных биоценозов Печорского моря.

Ключевые слова: Печорское море, многощетинковые черви, биоразнообразие, распределение, биогеография, трофическая группа.

Pechora Sea polychaete worms: biodiversity and spatial distribution

© 2021. S. Yu. Gagaev¹ ORCID: 0000-0002-8457-5156^{*}

S. G. Denisenko¹ ORCID: 0000-0003-1965-009X^{*} A. V. Sikorsky² ORCID: 0000-0001-8073-0027^{*}

N. A. Strelkova³ ORCID: 0000-0001-9721-1098^{*} E. A. Frolova⁴ ORCID: 0000-0001-9107-2400^{*}

¹Zoological Institute of Russian Academy of Sciences,

1, Universitetskaya Naberezhnaya, Saint Petersburg, Russia, 197034,

²Akvaplan-niva AS,

14, sgate, Hjalmar Johansen, Tromsø, Norway, 9007,

³Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (Polar branch named N. M. Knipovich), 6, Akademika Knipovicha St., Murmansk, Russia, 183038, ⁴Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 17, Vladimirskaia St., Murmansk, Russia, 183010, e-mail: gagaev24@yahoo.com

The modern taxonomic and geographical composition, trophic mode and spatial distribution of polychaete worms – one of the most important components of the bottom ecosystems of the Pechora Sea, is studied. This area characterized by the special abiotic conditions, a high level of biological production, a variety of biotopes and numerous populations of rare and protected species.

According to the materials of the last expeditions in the Pechora sea, 198 taxa of polychaete worms were identified including 165 species belonging to 113 genera, 34 families, and 14 orders.

Everywhere the species diversity of polychaetes and stress stability of their populations was high, with the exception of small areas, located near entrance to the Pechora and Khaypudir bays with amount of river runoff. The density of settlements widely varied from 26 to 7144 ind./m². Density gradients are most pronounced in the south-eastern shallow part of the Pechora Sea and in a lesser extent in the north-western of region. The spatial distribution of polychaete biomass is also heterogeneous, but varies much less in absolute terms from 0.7 to 387 g/m².

Four major groups represent the trophic mode of polychaete bioresources. More than half of the total biomass is created by surface detritivorous, a few less than a third – by subsurface detritivorous, 2% – by suspension feeders, and 10% – by carnivorous. The 80% of all polychaetes constituted only by six species, and the most significant of which are *Spiochaetopterus typicus* and *Maldane sarsi*.

During the last 70 years the number ratio of species belonging to main biogeographic groups remains stable, although the taxonomic list is constantly increasing. The stable state of polychaete taxocene, playing the significant role in the bottom ecosystems, assumes the stable state of bottom biocenoses of the Pechora Sea in general.

Keywords: Pechora Sea, polychaete worms, biodiversity, spatial distribution, biogeography, trophic mode.

Печорское море, как юго-восточная часть Баренцева моря, характеризуется своеобразными абиотическими условиями, высоким уровнем биологической продуктивности, разнообразием биотопов и многочисленными популяциями редких и охраняемых видов.

В связи с продолжающимся потеплением Арктики и экономическим развитием региона основными негативными факторами для биоты Печорского моря являются: нарастающее антропогенное беспокойство и загрязнение вод и берегов, как результат активного судоходства и наличия крупных портов.

Тревогу вызывает атлантический морж – наиболее уязвимый вид млекопитающих региона. Кроме того, здесь находятся несколько особо охраняемых природных территорий России, где гнездятся виды редких птиц. В настоящее время различными ведомствами ведётся мониторинг за биотой моря, в основе которого лежит сбор данных о состоянии зообентоса, который всесторонне отражает самочувствие экосистемы. Многощетинковые черви – значимая составляющая этой экогруппы.

Интерес к группе многощетинковых червей обоснован их заметной ролью в донных сообществах как всего Мирового океана, так и арктических морей. Изучению видового разнообразия, количественного развития

и распределения полихет в юго-восточной части Баренцева моря в 50-х – 90-х гг. XX века посвящено несколько работ [1, 2]. Учитывая совершенствование методики сбора бентосных проб, развитие таксономии и климатические изменения [3], резонно предположить, что роль полихет в донных сообществах и их видовое богатство может существенно отличаться от зарегистрированного ранее.

Целью работы является исследование современного таксономического, биогеографического и трофического состава полихет Печорского моря, особенностей качественного и количественного распределения и выяснение состояния их таксоценов в свете многолетнего изменения климата.

Материалы и методы исследования

Для изучения фауны и анализа количественного распределения полихет в пределах Печорского моря использовали материалы 214 количественных проб зообентоса (рис. 1, см. цветную вкладку), собранных сотрудниками ПИПРО на 44 станциях на судах «Смоленск» (сентябрь 2004 г.) и «Ф. Нансен» (август-сентябрь 2006 г.), а также на 26 станциях – сотрудниками ЗИН РАН на «Профессор В.В. Кузнецов» (август 2014 г., сентябрь 2016 г.).

Пробы отбирали на глубинах от 6 до 120 м дночерпателем Ван Вина (0,1 м²), 5 выборок на станции, промывая через сито с ячейёй 0,5 мм. Материал фиксировали забуференным 4–5% формальдегидом; через 3–4 месяца переводили в 75° этанол [1] и определяли до возможного таксономического уровня.

Взвешивание фиксированной влажной массы для каждого таксона осуществляли с точностью до 0,001 г.

Трофическая принадлежность установлена на основе публикаций [4, 5] и наблюдений авторов для категорий: грунтоеды – питание органическим веществом в донном осадке; собиратели – собирающие детрит с поверхности осадка; фильтраторы – потребители сестона; плотоядные – потребляющие как живых, так и мёртвых животных; всеядные – поедающие животную и растительную пищу; неопределённые – с неясным типом питания.

Биогеографическую природу каждого вида определяли в соответствии с общепринятыми схемами биогеографического районирования северных морей.

В период наблюдений анализировали следующие факторы среды: глубину, температуру, солёность и гранулометрический состав донных осадков.

Классическое точечное разнообразие или альфа-разнообразие полихет оценивали с помощью индекса Шеннона по общепринятой формуле. Кроме того, вычисляли таксономическое разнообразие [6], учитывающее не только количественную представленность конкретных видов, но и принадлежность их к определённым таксонам более высокого ранга: родам, семействам и отрядам.

Попарное сходство (бета-разнообразие) различных выборок червей вычисляли с использованием индекса Кульчинского [7]:

$$J_k = \frac{C}{2} \cdot \left(\frac{1}{D_{\min}} + \frac{1}{D_{\max}} \right),$$

где D_{\min} – количество видов в меньшей, D_{\max} – количество видов в большей, C – число общих видов в сравниваемых выборках. Это симметричная мера сходства, мало зависящая от размеров сравниваемых выборок, учитывает включение меньшей выборки в большую. Характеристики бета-разнообразия вычисляли как средние геометрические значений парного сходства каждой выборки с четырьмя ближайшими к ней по географическому положению.

Для оценки экологического стресса в популяциях полихет был использован индекс

разности выравненностей (difference of the evenness) [8] в виде:

$$D_{E'} = \frac{[H'_{(SpB)} - H'_{(SpA)}]}{\log_2(N)},$$

где $H'_{(SpB)}$ – информационное разнообразие видов по биомассе (бит/г), $H'_{(SpA)}$ – информационное разнообразие видов по численности (индекс Шеннона) (бит/экз.). Данный индекс меняется от -1 (полное отсутствие стресса) до +1 (наличие сильного стресса, соответствующего r -стратегии выживания) при переходном значении 0 [8].

Зависимость распределения суммарной биомассы и биомассы фонообразующих таксонов от глубины, температуры, солёности и степени заиленности донных осадков находили методом MARSpline регрессий (Statistica 8).

Фонообразующие таксоны выявлены методами геостатистических расчётов, применённых к результатам картографических построений.

Вычисления выполнены в офисном приложении Microsoft Excel 2010 и пакете PAST [9]; картографические построения и геостатистические расчёты – с помощью ГИС пакетов GoldenSoftware – Surfer 9 и Mapviewer 7.

Результаты и обсуждение

На основе прежних и новейших данных получен общий список многощетинковых червей Печорского моря, насчитывающий 198 таксонов, из которых 165 определены до вида, относящихся к 113 родам, 34 семействам и 14 отрядам. Большинство обнаруженных видов (81%) классифицированы как бореально-арктические, на долю бореальных, арктических и космополитов приходится примерно по 6,3%.

Сравнительно небольшое число таксонов обнаружено на минимальных глубинах от 8 до 16 м (15–22 вида) на юге и юго-востоке Печорского моря, а также на максимальных глубинах от 83 до 188 м (21 вид) на севере и северо-западе; в остальных случаях – от 25 до 61 вида на станции (рис. 2а, см. цв. вкладку).

Индексы Шеннона ($H'_{(SpA)}$ и $H'_{(SpB)}$) показали, что на большинстве станций информационное разнообразие видов высокое, а устойчивость к стрессу ($D_{E'}$) – вполне удовлетворительная, и лишь в нескольких случаях существует некоторая напряжённость экологической обстановки (рис. 2б, см. цв. вкладку).

Таксономическое разнообразие полихет [6], в отличие от информационного разно-

**С. Ю. Гагаев, С. Г. Денисенко, А. В. Сикорский,
Н. А. Стрелкова, Е. А. Фролова**
**«Многощетинковые черви (Polychaeta) Печорского моря:
биоразнообразие и распределение». С. 208.**

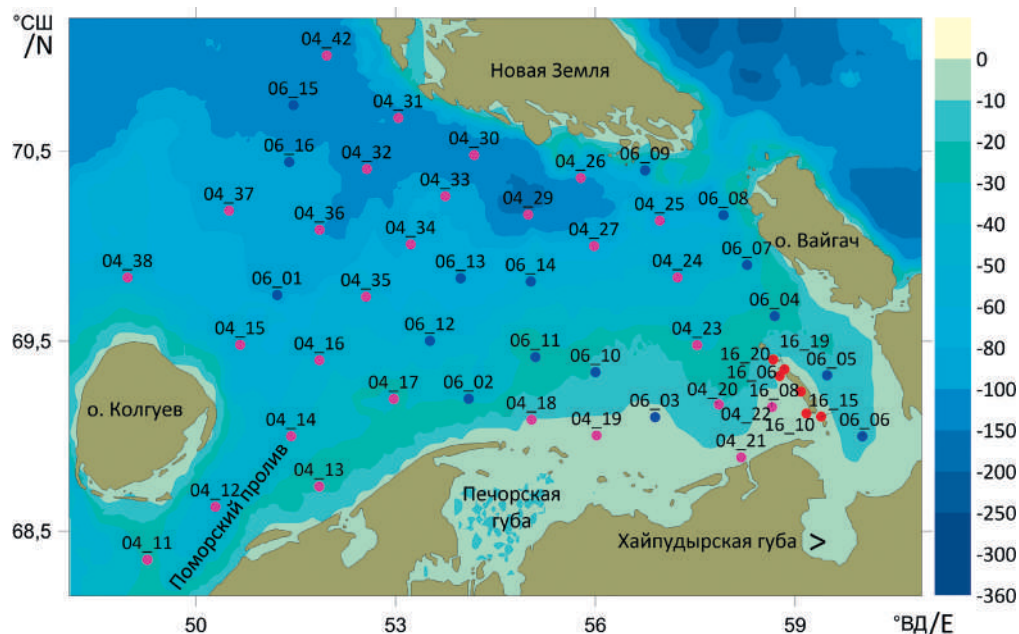


Рис. 1. Схема дночерпательных станций в Печорском море (розовые – 2004 г., синие – 2006 г., красные – 2014 г. и 2016 г.; градациями голубой заливки показаны глубины, м)

Fig. 1. Diagram of bottom grab stations in the Pechora Sea (pink – 2004, blue – 2006, red – 2014 and 2016; gradations of blue fill show depths, m)

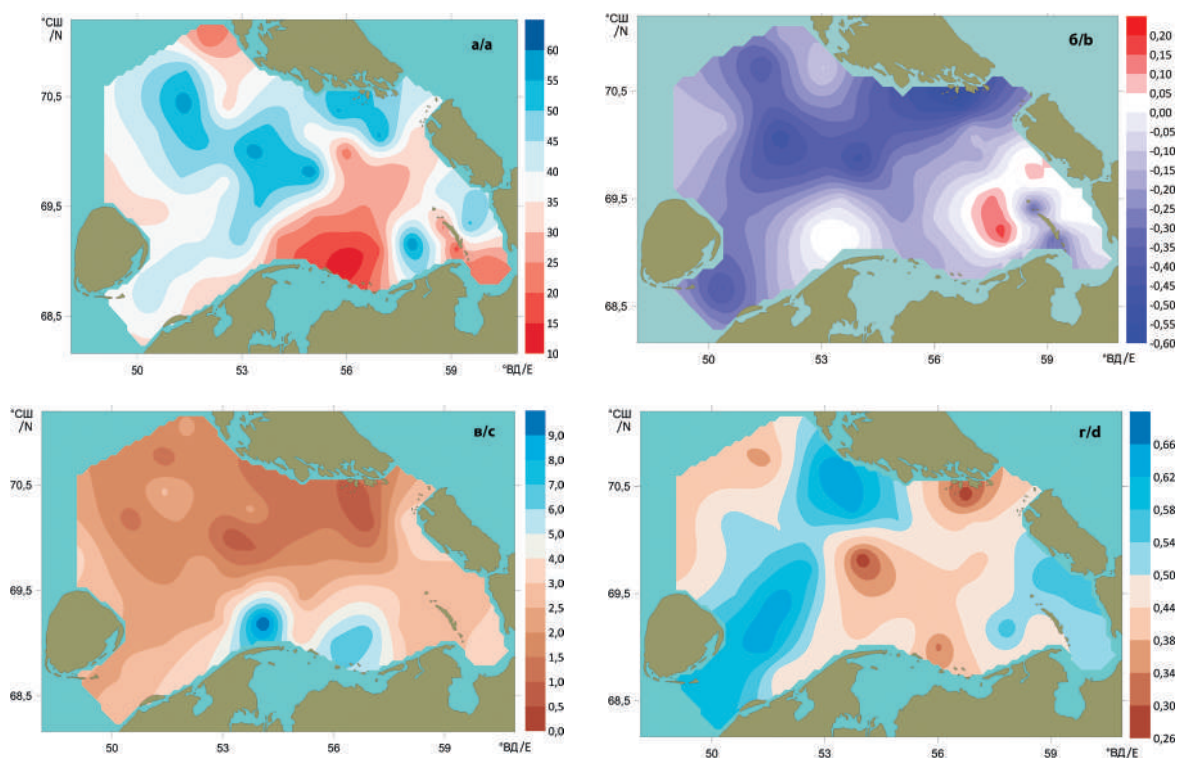


Рис. 2. Распределение постанционной количества видов (а), экологическое благополучие таксоцены (б, D_E), таксономическое разнообразие (в) и бета-разнообразие (г) полихет в Печорском море
Fig. 2. Distribution of the number of species at stations (а), ecological well-being of taxocene (б, D_E), taxonomic diversity (в) and beta diversity (д) polychaetes in the Pechora Sea

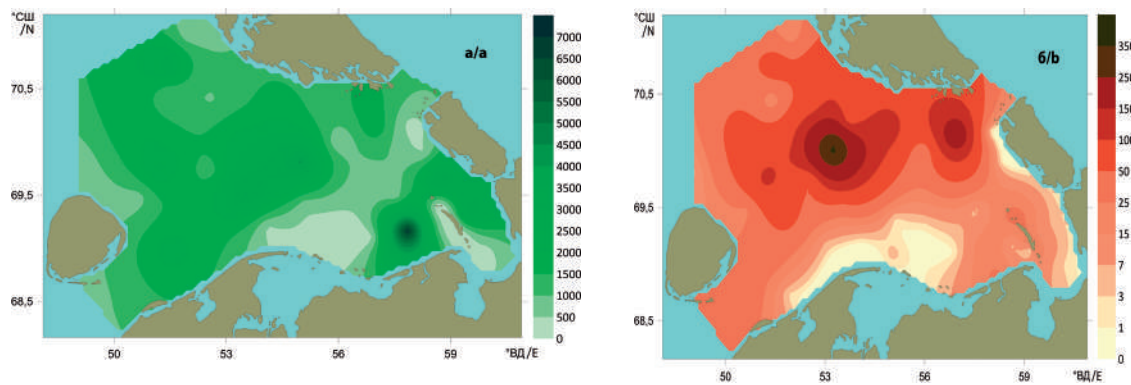


Рис. 3. Распределение плотности поселений (а, экз./м²) и общей биомассы (б, г/м²) полихет в Печорском море в 2003–2006 гг. / **Fig. 3.** Distribution of population density (a, ind./m²) and total biomass (b, g/m²) polychaetes in the Pechora Sea in 2003–2006

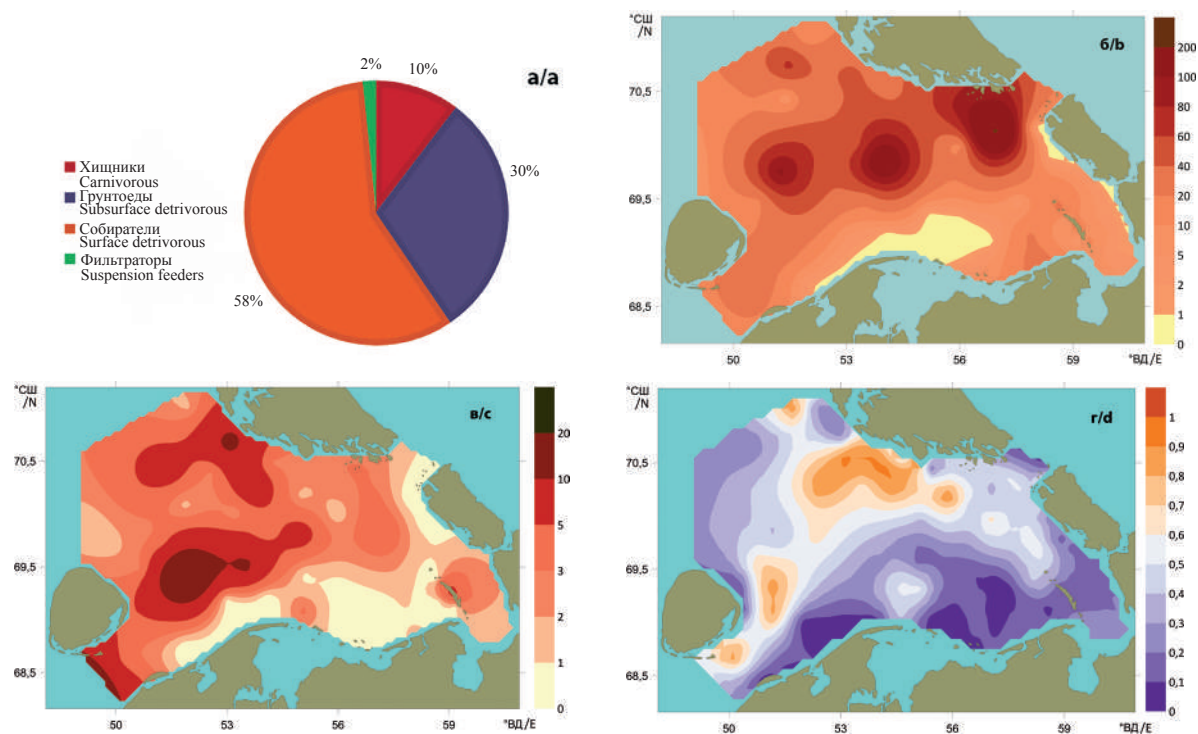


Рис. 4. Трофическая структура суммарной биомассы полихет в Печорском море (а), распределение биомассы собирающих детритофагов и грунтоедов (б, г/м²), биомассы хищников (в, г/м²) и степени заиленности донных осадков (г, %) / **Fig. 4.** The trophic structure of the total polychaete biomass in the Pechora Sea (a), the distribution of biomass of surfacedetritivorous and subsurface detritivorous (b, g/m²), predator biomass (c, g/m²) and the degree of siltation of bottom sediments (d, %)

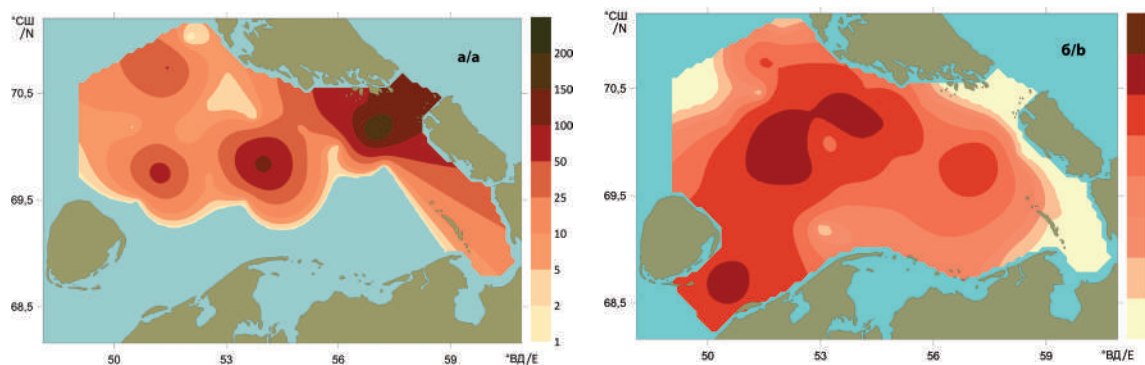


Рис. 5. Распределение биомассы (г/м²) *Spiochaetopterus typicus* (а) и *Maldane sarsi* (б) / **Fig. 5.** Biomass distribution (g/m²) of *Spiochaetopterus typicus* (a) and *Maldane sarsi* (b)

образия и «разности выравненностей», наиболее высоко в районах выходов из Печорской губы (рис. 2в, см. цв. вкладку). Самое высокое бета-разнообразие свойственно полихетам на станциях, расположенных вдоль наикратчайшего расстояния между Поморским проливом и Новой Землёй, а также – в самой восточной части Печорского моря от Хайпудырской губы до о. Вайгач (рис. 2г, см. цв. вкладку).

Плотность поселений полихет в районе исследований менялась в довольно широких пределах: от 26 до 7144 экз./м² (рис. 3а, см. цв. вкладку).

Изменения плотности поселений наиболее значительны в юго-восточной мелководной части моря и минимальны – в северо-западном районе. Пространственное распределение биомассы полихет также неоднородно, но в абсолютных величинах варьирует гораздо меньше: от 0,7 до 387 г/м² (рис. 3б, см. цв. вкладку).

Трофическая структура полихет представлена четырьмя основными группами (рис. 4а, см. цв. вкладку); более половины суммарной биомассы создают собиратели, несколько менее трети – грунтоеды, фильтраторы – 2%, а хищники – 10%. Собирающие детритофаги и грунтоеды сосредоточены в основном в районах с глубинами более 25 м в центральной и северо-западной части моря (рис. 4б и в, см. цв. вкладку) с сильной и умеренной заиленностью донных осадков (рис. 4г, см. цв. вкладку).

Наибольшую долю биоресурсов полихет (80%) составляют всего 6 видов (табл.), из которых наиболее значимы – *Spiochaetopterus typicus* и *Maldane sarsi*. Виды предпо-

читают ил, но *S. typicus*, в отличие от *M. sarsi*, избегает прибрежья, подверженного влиянию материкового стока (рис. 5, см. цв. вкладку).

В последней сводке [10] указано, что полихеты в водоёме насчитывают 176 таксонов, из которых 129 были определены до вида. Новые данные показывают, что разнообразие полихет здесь ещё большее – 165 видов. Возможно, это не только результат потепления в Арктике, но и следствие развития систематики многощетинковых червей, совершенствования методов сбора, рост интенсивности пробоотбора и использование мелкой ячеи для промывки.

Несмотря на возрастающее количество зарегистрированных видов полихет в изучаемой фауне, с 50-х гг. прошлого века до настоящего времени соотношения биогеографических групп остаются неизменными. Вероятно, происходящие климатические изменения не являются чем-то неожиданным и сверхординарным для ныне живущих популяций многощетинковых червей и легко компенсируются их врождёнными толерантными способностями.

Наименьшее количество видов было обнаружено к северо-востоку от Печорской губы – основном направлении стокового течения, и на выходе из Хайпудырской губы, в которую также впадает достаточно крупная река – Коротаиха (рис. 2а, см. цв. вкладку). Однако необходимо отметить, что сильному распреснению эти районы подвергаются только в весенний паводковый период, когда солёность у Новой Земли на глубине 10 м может падать до 26 ‰. Плохо поддаются какой-либо трактовке локальные минимумы числа видов

Таблица / Table
Вклад лидирующих видов полихет в суммарные биоресурсы Печорского моря
Contribution of the leading species of polychaetes to the total bioresources of the Pechora Sea

Виды Species	Тип питания Trophic mode	Средняя биомасса, г/м ² Average biomass, g/m ²	Доля в биоресурсах, % Share in bio-resources, %
<i>Spiochaetopterus typicus</i>	собирающий детритофаг surface detritivorous	36,9±0,45	40,6±0,75
<i>Maldane sarsi</i>	грунтоед subsurface detritivorous	11,6±0,50	25,4±0,8
<i>Cirrophorus branchiatus</i>	собирающий детритофаг surface detritivorous	13,3±0,13	7,1±0,21
<i>Nephtys ciliata</i>	плотоядный carnivorous	2,3±0,06	3,7±0,14
<i>Chone infundibuliformis</i>	фильтратор suspension feeders	2,1±0,11	1,6±0,17
<i>Scoletoma fragilis</i>	плотоядный carnivorous	2,8±0,15	1,5±0,24

в районе новоземельского п-ова Гусиная Земля и у северо-восточного побережья о. Колгуев.

Таксономическое разнообразие полихет, учитывающее как численность таксонов, так и их родственные отношения, распределяется фактически противоположным образом по отношению к обычному видовому богатству и информационному разнообразию (рис. 2в, см. цв. вкладку). Это логично объясняется эффектом «экотона», где, несмотря на границу между морскими и эстуарными сообществами гидробионтов, может быть больше экологических ниш для разных неблизкородственных видов, нежели в чисто морских или эстуарных условиях.

Показатель разности выравненностей (D_E) позволил выявить признаки стресса (положительные значения индекса) на двух станциях 2004 г. (№№ 17, 20) и четырёх 2006 г. (№№ 2, 4, 5 и 7). Все они – на юге и юго-востоке Печорского моря на сравнительно небольших глубинах (19–36 м), песчано-глинистых грунтах, в зоне выраженного влияния стока Печоры. В таксоценозах доминируют *Galathowenia oculata*. Дополнительным фактором, обуславливающим некоторую экологическую напряжённость на данных участках, может быть обеднённость донных осадков органическими веществами. Во всех остальных случаях рассчитанный индекс (D_E) имеет отрицательные значения и варьирует в пределах от -0,05 до -0,57, что свидетельствует о благополучном состоянии большей части популяций полихет Печорского моря.

Распределение постанционного бета-разнообразия (рис. 2г, см. цв. вкладку) показывает, что выраженные таксономические пространственно-компактные таксоцены многощетинковых червей могут существовать примерно на трети акватории Печорского моря: 1 – в Поморском проливе и к востоку от о. Колгуев; 2 – к юго-западу от Новой Земли; 3 – на выходе из Хайпудырской губы и к юго-востоку от о. Вайгач; 4 – к юго-западу от северной оконечности о. Долгий. Это могут быть и типичные структурированные от центра к периферии сообщества и экоклины, постепенно меняющие свой состав в определённом направлении.

Распределение плотности поселений полихет в Печорском море несколько отличается от распределения этих показателей бентоса в целом [10]. Действительно, районы с относительно низкими значениями численности червей (26–159 экз./м²) расположены

в непосредственной близости от Печорской и Хайпудырской губ на глубинах 10–14 м с преимущественно песчанистыми грунтами, хорошо промываемыми приливно-отливными и ветровыми течениями, перемещаемыми и истираемыми прибрежным льдом [11] (рис. 3а, см. цв. вкладку). Наиболее высокие значения плотности поселений полихет (порядка 2000–6000 экз./м²) присущи районам на юге и юго-востоке Печорского моря вокруг о. Долгий, где в летний сезон гнездится много птиц, дающих огромное количество биогенов. Биогены взрывообразно повышают первичную продукцию в столбе воды, из-за чего вертикальный поток органики на дно кратковременно возрастает и создаёт благоприятные условия для многих мелких форм зообентоса с *r*-стратегий выживания. В определённой степени такое предположение подтверждается относительно небольшой биомассой полихет в этих районах.

Распределение биомассы полихет имеет некоторое сходство с распределением их численности. Наибольшие значения – на участках дна с высоким содержанием органических веществ: илы с глиной, песком и галькой, наименьшие – в южном и юго-восточном районах с песчанистыми грунтами, а также в непосредственной близости от Печорской и Хайпудырской губ (0,7–5,3 г/м²), где выражено влияние речного стока; хотя и на больших глубинах (53 м) в типично морских условиях севернее о. Колгуев её величина может быть порядка 10 г/м². Тем не менее, максимальных значений биомасса достигает в центральной части моря и к югу от Новой Земли в диапазоне глубин от 76 до 123 м на илистом песке, глине и камнях (110–151 г/м²), т. е. в типично морских условиях обитания, которые характеризуются не только более высоким видовым разнообразием, но и большей биомассой по сравнению с распреснёнными районами [12, 13]. В северо-западной части моря, где отмечены наибольшие значения биомассы всего бентоса, она изменялась в пределах 11–66 г/м².

Анализ предпочтительных типов питания полихет в условиях Печорского моря показывает, что доля червей-фильтраторов выше на мелководье, где биомасса минимальна. Виды-детритофаги (собирающие и грунтоеды) преобладают в морских условиях, на богатых органикой грунтах, там – где биомасса наиболее высокая. На станциях со средними значениями биомассы, на менее богатых детритом грунтах, доля детритофагов близка к таковому на мелководьях, но в ущерб филь-

траторам, которые не находят в этих условиях достаточного количества пищи в водной толще [14]. В целом детритофаги демонстрируют локальные максимумы биомассы в районах с наиболее заиленными осадками (рис. 4г, см. цв. вкладку), а биомасса хищников хорошо коррелирует с общей биомассой полихет только в центральной части моря, и это, видимо, результат того, что их жертвами могут быть не только полихеты, но представители других таксонов.

Наиболее значимые в биоресурсах полихет в Печорском море *Spiochaetopterus typicus* и *Maldane sarsi* имеют перекрывающиеся ареалы распределения в водоёме (рис. 5, см. цв. вкладку). Результаты регрессионного MARSpline моделирования показали, что количественное распределение первого вида имеет слабую зависимость от температуры и солёности воды, но гораздо большую – от степени заиленности донных осадков (откорректированный коэффициент детерминации модели – 0,32). Второй вид – показывает только слабую зависимость от заиленности (коэффициент детерминации – 0,14).

Заключение

Данные исследования уточняют пространственное распределение структурных и функциональных характеристик многощетинковых червей в Печорском море и пополняют фаунистический список полихет, до 165 видов, относящихся к 113 родам, 34 семействам и 14 отрядам; указывают не только на благополучное состояние таксоценов полихет и стабильность их биогеографического состава в водоёме, но и, с учётом существенной роли этой группы в сообществах, предполагают благополучие донных биоценозов. Таксономическое разнообразие полихет, в отличие от информационного разнообразия и «разности выравненностей», наиболее высоко в районах выходов из Печорской губы. Изменения плотности поселений наиболее значительны в юго-восточной мелководной части моря и минимальны – в северо-западном районе. Пространственное распределение биомассы полихет также неоднородно, но в абсолютных величинах варьирует гораздо меньше. Показатель разности выравненностей (D_E) выявляет признаки стресса на некоторых станциях юга и юго-востока Печорского моря на сравнительно небольших глубинах (19–36 м), в зоне выраженного влияния стока Печоры. Дополнительным фактором, обуславливающим

некоторую экологическую напряжённость на данных участках, может быть обеднённость донных осадков органическими веществами. Во всех остальных случаях рассчитанный индекс (D_E) имеет отрицательные значения, что свидетельствует о благополучном состоянии большей части популяций полихет Печорского моря. В трофической структуре полихет преобладают собиратели и грунтоеды, населяющие в основном центральную и северо-западную часть моря на глубинах более 25 м. Наибольшая доля биоресурсов полихет (80%) приходится на 6 видов, из которых наиболее значимы – *Spiochaetopterus typicus* и *Maldane sarsi*.

Работа выполнена в рамках исследования по теме госбюджетного финансирования № АААА-А17-117030310207-3 в Зоологическом институте РАН и при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-60157 и за счёт средств Норвежского исследовательского совета (проект 233635/Н30).

References

1. Streltsov V.E. Quantitative distribution of polychaetes (Polychaeta) in the southern part of the Barent Sea // Composition and distribution of plankton and benthos in the southern part of the Barents Sea. Moskva, Leningrad: Nauka, 1966. P. 71–92 (in Russian).
2. Sikorsky A.V. Results of processing materials on polychaetes from the southern part of the Barents Sea // Trophic relationships between benthos organisms and bottom fishes of the Barents Sea. Apatity, Kolskiy nauchnyy tsentr AN SSSR, 1989. P. 56–64 (in Russian).
3. Matishov G.G., Makarevich P.R., Moiseev D.V. Climate and large marine ecosystems of the Arctic: report to the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Rostov-na-Donu, Yuzhnyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk, 2016. 96 p. (in Russian). doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018-9-4-5-14
4. Dahle S., Denisenko S.G., Denisenko N.V., Cochrane S. Benthic fauna in the Pechora Sea // Sarsia. 1998. V. 83. P. 183–210. doi: 10.1007/s00300-006-0232-4
5. Fauchald K., Jumars P.A. The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds // Oceanography and Marine Biology Annual Review. 1979. V. 17. P. 193–284.
6. Clarke K.R., Warwick R.M. A taxonomic distinctness index and its statistical properties // Journal of Applied Ecology. 1998. V. 35. P. 523–531. doi: 10.1007/s004420050379
7. Kulczynsky S. Zespoly r slin w Pienach // Bulletin International de L'Academie Polonaise des Sciences et des Letters, Classe des Sciences Mathematiques et Naturelles. 1927. Serie B, Supplement II, Suppl. 2. P. 57–203 (in French).

8. Denisenko S.G. Shannon's information measure and its use for biodiversity assessment (as exemplified by marine zoobenthos) // *Issledovaniya fauny morey*. 2006. V. 56 (64). P. 35–46 (in Russian).

9. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. Paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. No. 4 (1). P. 1–9.

10. Denisenko S.G. Biodiversity and bioresources of macrozoobenthos in the Barents Sea. Structure and long-term changes. Sankt-Peterburg: Nauka, 2013. 284 p. (in Russian).

11. Gutt J., Starmans A., Dieckman G. Impact of icebergs scouring on polar benthic habitats // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1996. V. 16. No. 2. P. 115–128.

12. Remane A. Die Brackwasser fauna // *Zoologischer Anzeiger (Supplement)*. 1934. V. 7. P. 34–74.

13. Remane A., Schlieper C. *Biology of Brackish Water*, second revised ed. John Wiley and Sons Inc., New York–Toronto–Sydney. 1971. 372 p.

14. Loring D.H., Naes K., Dhale S., Matishov G.G. Arsenic, trace metals, and microcontamination in sediments from the Pechora Sea, Russia // *Marine Geology*. 1995. V. 2. P. 153–167.

Структура хортобионтной энтомофауны среднетаёжного болота (Вологодская область)

© 2021. С. В. Пестов^{1,2}, к. б. н., доцент, Д. А. Филиппов^{3,4}, к. б. н., в. н. с.,

¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167928, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

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

³Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН,
152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109,

⁴AquaBioSafe, Тюменский государственный университет,
625003, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6,
e-mail: pestov@ib.komisc.ru, philippov_d@mail.ru

Энтомофауна болотных экосистем Вологодской области по литературным данным и оригинальным исследованиям насчитывает 465 видов. Наибольшее количество видов выявлено в отрядах Coleoptera (156), Diptera (97), Lepidoptera (50). В трофической структуре преобладают зоофаги (204 вида), тогда как роль фитофагов, а также сапрофагов несколько меньше (164 и 97 видов соответственно). Сезонные и типологические изменения структуры населения наземных членистоногих изучались на болоте Шиченгское – крупной болотной системе (15,9 тыс. га), расположенной в средней тайге. В пределах болота были выбраны три пробные площадки (отличающиеся характером растительного покрова, гидрологическим режимом и удалённостью от края болота): проточная топь, грядово-мочажинный комплекс и долина болотного ручья на окраине болота. На каждой площадке с мая по сентябрь 2013 г. проводился учёт членистоногих с использованием методики кошения энтомологическим сачком. Показано, что каждый тип болотных участков обладает своими особенностями структуры и динамики населения беспозвоночных хортобионтов – обитателей травяно-кустарничкового яруса. Так, для наземной энтомофауны болотных экосистем тип биотопа имеет более значимое влияние ($F = 11,96; p = 0,0014$) по сравнению со временем отбора материала ($F = 3,61; p = 0,0278$), а влияние второй переменной (даты сбора) в большей степени определяется сезонным ходом температур воздуха. Выявлены особенности сезонного хода численности разных трофических групп: сапрофаги, хищники и паразиты имеют максимальное обилие в июне или июле, а фитофаги – в конце вегетационного сезона.

Ключевые слова: наземные членистоногие, насекомые, болотные экосистемы, энтомофауна болот, трофические группы, Вологодская область.

Structure of the plant-inhabiting insect fauna in a middle-taiga mire (Vologda Region, Russia)

© 2021. S. V. Pestov^{1,2}, ORCID: 0000-0002-5464-793X²

D. A. Philippov^{3,4}, ORCID: 0000-0003-3075-1959²

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167928,

²Vyatka State University,
610000, Russia, Kirov, Moskovskaya St., 36,

³Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,
109, Borok, Nekouzskiy District, Yaroslavl Region, Russia, 152742,

⁴AquaBioSafe, Tyumen State University,
6, Volodarskogo St., Tyumen, Russia, 625003,
e-mail: pestov@ib.komisc.ru, philippov_d@mail.ru

According to the literature data and original research, the entomofauna of mire ecosystems in the Vologda Region has 465 species. Three orders have the largest number of species: Coleoptera – 156, Diptera – 97, and Lepidoptera – 50 species. In the trophic structure, zoophages are the most abundant (204 species), while the role of phytophages and saprophages is somewhat less (164 and 97 species, respectively). Seasonal and typological changes in the structure of terrestrial

arthropods were studied in the model system, Shichengskoe mire, a large middle-taiga wetland (15.9 thousand ha). Three sampling plots were set within the mire (differing in vegetation, hydrological regime, and distance from the mire margin): a fen strip, a ridge-hollow site, and a mire stream valley at the mire margin. At each sampling plot, from May to September 2013, sampling was conducted using a sweeping net. The results showed that each studied mire site had unique features of the entomofauna structure and dynamics. The type of mire site had a more significant influence on the terrestrial insect fauna ($F = 11.96, p = 0.0014$) than the time of sampling ($F = 3.61, p = 0.0278$); the influence of sampling time is determined mainly by the seasonal changes in temperature course. Specific seasonal changes in the abundance of the insect trophic groups were found: saprophages, predators and parasites were the most abundant in June and July, while phytophages – at the end of the vegetation period.

Keywords: terrestrial arthropods, Insecta, mire ecosystems, entomofauna of mires, trophic groups, Vologda Region.

Торфяные болота, как элемент ландшафта, являются важным звеном в цепи взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов среды. Болота участвуют в круговороте воды и углерода, играют важную роль в формировании климата [1–3]. Изучение закономерностей взаимосвязей живых компонентов болотных экосистем необходимо для осуществления рационального хозяйственного использования и охраны водно-болотных угодий [4]. Одним из существенных компонентов биоты болотных экосистем являются беспозвоночные. Они не только вносят вклад в поддержание биоразнообразия континентальных экосистем [5–11], но играют важную роль, например, в разложении растительных остатков [12], опылении энтомофильных растений [13–15]. Большое значение в поддержании целостности экосистем (в том числе и болотных) имеют трофические связи [16–19]. Соотношение различных трофических групп зооценоза может служить индикатором стабильности состояния экосистемы в целом.

Целью исследования является обобщение сведений о видовом составе энтомофауны болотных экосистем Вологодской области и выявление структуры и динамики населения членистоногих хортобионтов, обитателей травяно-кустарничкового яруса, на примере типичного для региона болота Шиченгское.

Район исследований, материалы и методы

В основу настоящей статьи положены оригинальные материалы, дополненные литературными сведениями по насекомым болот региона [20–22].

В качестве модельной территории для изучения хортобионтов выбрано болото Шиченгское, расположенное в центральной части Вологодской области (Сямженский район) в пределах подзоны средней тайги. С 1987 г. значительная часть данного болота входит в состав регионального ландшафтного заказника «Шиченгский».

Болото представляет собой крупную (15,9 тыс. га) болотную систему. Оно сформировалось на юго-восточных отрогах Харовской гряды в обширной озёрно-ледниковой котловине, окружённой моренными и камовыми холмами, преимущественно лимногенным путём. По классификации [23] болото Шиченгское относится к кассандрово-морозково-сфагновому печорско-онежскому типу группы северо-восточно-европейских сфагновых верховых болот класса сфагновые болота.

В настоящее время болото находится в основном на олиготрофной стадии развития. Значительные участки заняты сосново-кустарничково-сфагновыми, кустарничково-сфагновыми и пушицево-кустарничково-сфагновыми сообществами в пределах грядово-мочажинных, кочковато-мочажинных и коврово-мочажинных болотных комплексов. На кочках и грядах доминирует *Sphagnum fuscum*, реже *S. angustifolium* и *S. magellanicum* coll., в мочажинах – *S. cuspidatum*, *S. balticum*, реже *S. majus*, *S. fallax*. Вблизи внутриболотных минеральных островов формируются необлесённые (открытые) болотнотравяно-сфагновые мезоолиготрофные проточные топи. Окрайки болота выражены слабо, как правило, облесены мелколиственными породами (*Betula pubescens*, *Salix pentandra*, *Alnus glutinosa*) и имеют эвтрофный характер [24].

В центральной части болота расположено внутриболотное дистрофное озеро Шиченгское (1,06 тыс. га). В озеро впадает около десяти ручьёв и две малые реки – Сондушка и Глухая Сондушка. Озеро служит истоком р. Шиченга – правым притоком р. Сямжена (бассейн Белого моря). Для юго-восточной части болота (между рр. Шиченга, Сондушка, Глухая Сондушка) наиболее характерны эвтрофные и отчасти мезотрофные травяно-гипновые и травяно-сфагновые болотные фитоценозы.

В пределах указанного болотного массива были выбраны три модельных участка, отличающихся характером растительного

Таблица 1 / Table 1

Метеорологическая характеристика модельных участков болота Шиченгское
 Meteorological characteristics of the sampling plots of the Shichengskoe mire

Дата Sampling date	Температура воздуха, °C Air temperature, °C			Влажность, % Relative humidity, %		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
07.05.2013	9,4±0,83	10,4±1,08	8,4±0,93	51,9±2,73	51,5±3,08	51,5±2,60
25.05.2013	15,5±0,47	16,5±0,58	14,6±0,4	91,5±1,06	88,0±1,47	94,6±0,51
09.06.2013	16,3±0,87	18,2±1,13	15,5±0,68	73,2±2,97	69,6±3,35	75,5±2,11
27.06.2013	27,1±0,82	28,3±1,09	24,1±0,65	64,9±2,72	65,0±3,02	79,1±2,08
14.07.2013	17,4±1,25	18,4±1,40	14,6±0,85	55,8±3,31	57,1±3,62	69,9±2,27
26.08.2013	8,0±0,66	8,9±0,69	8,0±0,49	85,6±1,27	84,7±1,40	87,3±0,58
17.09.2013	14,1±0,40	13,9±0,59	13,4±0,35	84,0±1,57	83,4±1,81	85,5±1,17

Примечание: S1 – проточная топь, S2 – участок на границе внутриболотного острова с грядово-мочажинными комплексами, S3 – облесённая крайка болота вдоль болотного ручья.

Note: S1 – flow-through fen strip, S2 – a ridge-hollow site on the edge of an intra-mire mineral island, S3 – forested mire margin along the mire stream.

покрова, гидрологическим режимом и удалённостью от края болота: S1) открытая (необлесённая) проточная мезоолиготрофная топь (59°56'42" с. ш., 41°17'07" в. д.); S2) олиготрофный грядово-мочажинный комплекс (59°56'30" с. ш., 41°16'57" в. д.); S3) долина болотного ручья на облесённой эвтрофной крайке болота (59°56'25" с. ш., 41°16'06" в. д.). На каждой площадке с мая по сентябрь 2013 г. проводили учёт членистоногих с использованием методики кошения энтомологическим сачком (по 30 взмахов в трёх повторностях; диаметр обруча 30 см). Проводили также ручной сбор насекомых и вне стандартных пробных площадей [25].

На болоте Шиченгское в течение вегетационного сезона 2013 г. были проведены измерения температуры и относительной влажности воздуха (0,5 м от поверхности) с помощью регистраторов DT-171 (Elma Instruments) на трёх болотных участках: 1) проточная топь (S1), 2) на границе внутриболотного острова с грядово-мочажинным комплексом (S2), 3) облесённая крайка болота вдоль болотного ручья (S3) [26]. В таблице 1 приведены среднесуточные микроклиматические данные для дат, в которые проводились энтомологические учёты.

Результаты и обсуждение

В настоящее время на болотах Вологодской области выявлено 465 видов насекомых, таксономический состав и трофическая специализация которых в обобщённой форме приведена в таблице 2.

Учёт обитателей травяно-кустарничкового яруса на бол. Шиченгское показал неодно-

родность в составе и количественных значениях энтомофауны в разных типах болотных участков (рис.). Например, наибольшее обилие членистоногих в проточной топи пик приходится на 9 июня (109 экз./30 взмахов сачка), на приручьевом болотном участке – на 27 июня (223 экз./30 взмахов сачка), а в грядово-мочажинном комплексе – 14 июля (63 экз./30 взмахов сачка). Отмечено, что обилие арthropод в сообществах увеличивается в ряду грядово-мочажинный комплекс – проточная топь – долина болотного ручья, что, вероятно, связано с различиями в видовом богатстве цветковых растений, продуктивности травяного яруса.

Двумерный дисперсионный анализ позволил выявить пространственно-временную неоднородность комплекса хортобионтных беспозвоночных болотных экосистем: обнаружено более значимое влияние типа биотопа ($F = 11,96$; $p = 0,0014$) по сравнению со сроками отбора материала ($F = 3,61$; $p = 0,0278$) на общую численность обитателей травяно-кустарничкового яруса. Влияние второй переменной (даты сбора) в большей степени определяется сезонным ходом температур воздуха.

В трофической структуре комплексов беспозвоночных обитающих в травяно-кустарничковом ярусе болотных экосистем преобладающими группами являются сапрофаги, хищники и фитофаги (табл. 3).

К сапрофагам относятся несколько семейств двукрылых Sciaridae, Bibionidae, Heleomyzidae, Lauxaniidae и некоторые другие акаллитратные семейства. Типичными болотными из них являются четыре вида коллембол (*Isotoma viridis* Bourlet, *Pachyotoma crassi-*

Таблица 2 / Table 2

Таксономический состав и трофическая специализация разных отрядов насекомых болотных экосистем Вологодской области
Taxonomic composition and trophic specialization of different orders of insects in mire ecosystems of the Vologda Region

Отряд / Order	Трофическая группа / Trophic group			Всего видов Total number of species
	зоофаги zoophagous	сапрофаги saprophagous	фитофаги phytophagous	
Blattodea	–	2		2
Coleoptera	77	19	60	156
Collembola	9	37	–	46
Diptera	55	38	4	97
Ephemeroptera	1	–	–	1
Heteroptera	9	–	15	24
Homoptera	–	–	18	18
Hymenoptera	22	–	17	39
Lepidoptera	–	–	50	50
Odonata	26	–	–	26
Plecoptera	1	–	–	1
Thysanoptera	–	1	–	1
Trichoptera	4	–	–	4
Всего видов Total species	204	97	164	465

Примечание: прочерк означает отсутствие данной группы.
Note: a dash means that no individuals belonging to the group were found.

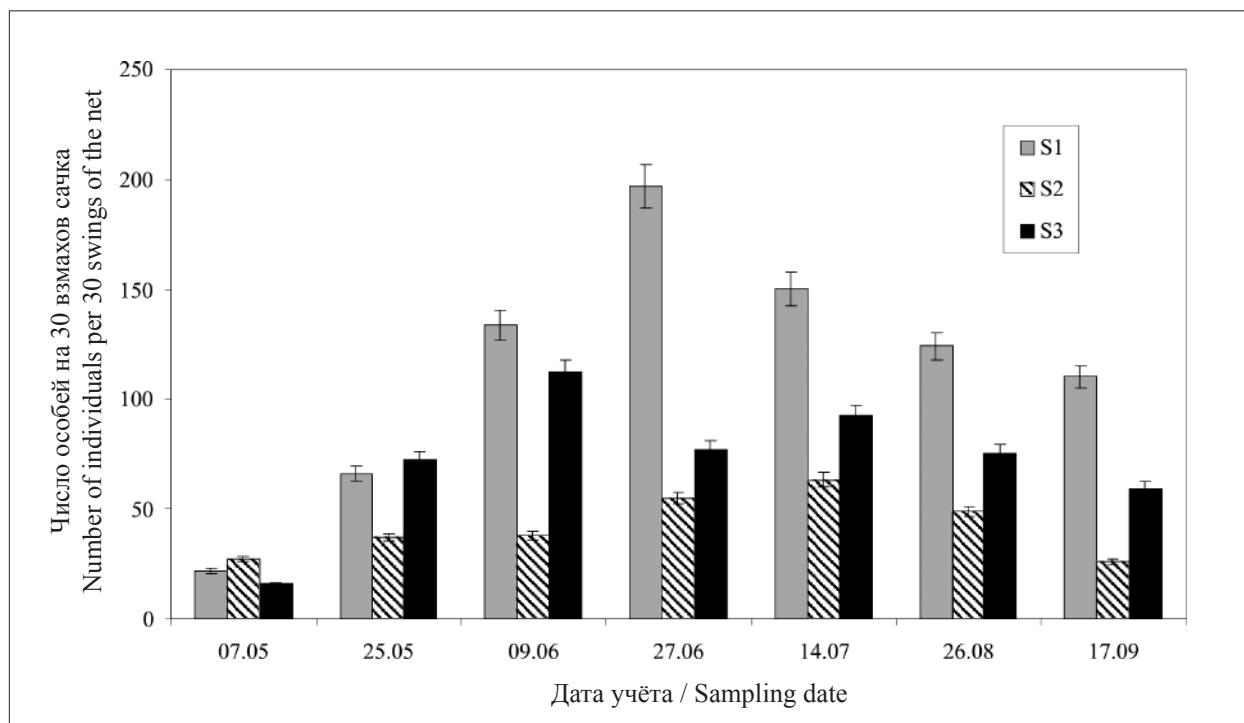


Рис. Динамика общего обилия (экз./30 взмахов сачка) наземных членистоногих среднетаёжного болота (2013 г.). Обозначения участков как в таблице 1
Fig. Dynamics of the total abundance (ind./30 swings) of terrestrial arthropods of the middle-taiga mire (2013). Site designations as in Table 1

Таблица 3 / Table 3

Сезонные изменения обилия (экз./30 взмахов сачка) трофических групп членистоногих травяно-кустарничкового яруса среднетаёжного болота (2013 г.)
Seasonal changes in the abundance (ind./30 swings) of trophic groups of arthropods in the herb-dwarf shrub layer of the middle-taiga mire (2013)

Трофическая группа Trophic group	Дата учёта / Sampling date						
	07.05	25.05	09.06	27.06	14.07	26.08	17.09
Облесённая окрайка болота вдоль болотного ручья Forested mire margin along the mire stream							
Сапрофаги / Saprophagous	29	60	193	259	109	105	88
Фитофаги / Phytophagous	12	50	57	176	196	212	306
Зоофаги / Zoophagous	28	97	169	234	233	157	87
Участок на границе внутриболотного острова с грядово-мочажинными комплексами A ridge-hollow site on the edge of an intra-mire mineral island							
Сапрофаги / Saprophagous	46	24	15	21	15	13	15
Фитофаги / Phytophagous	20	50	34	63	95	40	49
Зоофаги / Zoophagous	2	11	43	34	53	12	14
Проточная топь / Flow-through fen strip							
Сапрофаги / Saprophagous	9	71	55	78	51	49	25
Фитофаги / Phytophagous	8	37	88	57	97	86	137
Зоофаги / Zoophagous	10	50	160	80	86	41	15

cauda (Tullberg), *Arrhopalites principalis* Stach, *Sminthurides schoetti* Axelson) и пять видов жуков (*Ampedus balteatus* (L.), *Actenicerus sjællandicus* (Mueller), *Microcara testacea* (L.), *Cyphon padi* (L.) и *Gymnusa* sp.). На приручьевом участке и в проточной топи максимальной численности они достигают в конце июня, на грядово-мочажинном участке – в начале мая.

Фитофаги включают полужесткокрылых (Miridae, Pentatomidae, Tingidae), равнокрылых (Aphidae, Aphrophoridae, Cicadellidae), жесткокрылых (Chrysomelidae, Curculionidae), чешуекрылых (Pieridae, Zygaenidae, Tortricidae). На всех участках численность фитофагов возрастает к концу вегетационного сезона к началу сентября. У 61 вида фитофагов в спектр питания входят болотные растения, из них 28 видов являются узкоспециализированными палюстробионтами. Среди хортофагов, потребителей травянистых растений, 11 видов питаются морошкой *Aphthona lutescens* (Gyllenhal), *Eusphalerum lapponicum* (Mann.), осоками *Aphthona erichsoni* (Ztt.), *Chaetocnema sahlbergii* (Gyllenhal), *Plateumaris sericea* (L.), *Agramma femorale* Thomson, *Neophilaenus lineatus* (L.), пушицей *Sorhoanus xanthoneurus* (Fieber), *Celaena haworthii* (Curtis), сфагновыми мхами *Phalacrocerca replicata* (L.), *Triogma trisulcata* (Schummel). Из тамнофагов 9 видов питаются болотными кустарничками семейства вересковые (клюква, голубика, черника, кассандра, андромеда, багульник):

Stephanitis oberti (Kolenati), *Ophiola russeola* (Fallen), *Cacopsylla ledi* (Flor), *Arichanna melanaria* (L.), *Anarta myrtilli* (L.), *Rhagades pruni* (Den. et Schiff.), *Plebejus optilete* (Knoch), *Boloria aquilonarise* (Stichel), *Colias palaeno* (L.). Из 25 видов дендрофагов, питающихся только древесными растениями, ни один не приручен к болотам. В группе дендро-тамнофагов (5 видов) один вид совок *Acronicta menyanthidis* (Esper) предпочитает в пищевом спектре клюкву и голубику. Среди тамно-хортофагов (15 видов), в круг кормовых растений которых входят травянистые растения (морошка) и вересковые кустарнички, можно отметить семь видов бабочек: *Diacrisia sannio* (L.), *Carsia sororiata* (Hb.), *Macrothylacia rubi* (L.), *Syngrapha microgamma* (Hb.), *Callophrys rubi* (L.), *Celastrina argiolus* (L.) и *Clossiana eunomia* (Esper).

Наибольшее ценотическое значение из трофической группы хищников имеют полужесткокрылые (Nabidae), жесткокрылые (Cantharidae Coccinellidae Oedemeridae), сетчатокрылые (Chrysopidae, Hemerobidae), перепончатокрылые (Formicidae), двукрылые (Dolichopodidae, Empididae, Hybotidae, Scathophagidae, Phoridae, Syrphidae). К микрозоофагам отнесены девять видов коллембол, из которых типично болотным видом является *Desoria neglecta* (Schaeffer) [27]. Из хищников-энтомофагов болотные местообитания предпочитают 19 видов *Sympetrum danae* (Sulzer), *Hebrus pussilus* (Fl.), *Hebrus ruficeps* Thomson,

Agonum ericeti (Pz.), *Cantharis paludosa* Fallén, *Coccinella hieroglyphica* L., *Formica candida* Smith, *Formica trunctorum* Fabricius, *Atylotus fulvus* (Mg.), *Atylotus plebejus* (Fl.), *Atylotus sublunaticornis* (Zett.), *Chrysops nigripes* (Zett.), *Chrysops sepulcralis* (F.), *Hybomitra kauri* (Chvala et Lyn.), *Hybomitra lapponica* (Wahlb.), *Hybomitra lundbecki* (Lyn.), *Empis borealis* Linnaeus, *Melanostoma dubium* (Zett.), *Limnia paludicola* Elberg. В болотных сообществах на территории Вологодской области отмечено всего восемь видов насекомых-паразитов, что, скорее всего, связано с недостаточной изученностью этой группы.

В грядово-мочажинном комплексе и проточной топи численность хищников максимальна в начале вегетационного сезона (с начала мая до первой декады июня), а позднее их роль в структуре болотной фауны снижается. На приручьевом участке хищники максимальной численности достигают в конце июня – начале июля.

Заключение

Для болотных экосистем Вологодской области в настоящее время выявлено 465 видов насекомых. При исследовании крупного среднетаёжного болота Шиченгское нами показано, что структура и сезонная динамика энтомофаун в разных типах болот отличается. Выявлено, что на трёх разнотипных болотных участках модельного объекта пики численности беспозвоночных травяно-кустарничкового яруса не совпадают: в проточных топях максимум обилия приходится на первую декаду июня, на приручьевом болотном участке – в третью декаду июня, а в мочажинах грядово-мочажинных комплексов – во вторую декаду июля. Свои особенности сезонного хода численности имеют и разные трофические группы артропод. Так сапрофаги, хищники и паразиты имеют максимальное обилие в июне или июле, тогда как фитофаги достигают высокой численности в конце вегетационного сезона (конец августа – начало сентября). Это связано с адаптацией жизненного цикла фитофагов к характеру сезонного развития кормовых растений. Листья растений начинают интенсивно повреждаться насекомыми после периода цветения или после плодоношения. Такие различия, вероятно, связаны с различиями водного режима данных местообитаний. Полученные данные можно будет использовать при разработке системы мониторинга биоразнообразия болотных экосистем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Правительства Тюменской области по проекту Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (2). Частично работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

Авторы благодарят В. А. Филиппова за помощь в полевых работах.

References

1. Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukninin A.I., Shibistova O.B. Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle // *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2005. V. 12. No. 4. P. 631–650 (in Russian).
2. Volkova I.I., Baikov K.S., Syso A.I. Kuznetsk Alatau mires as filters for natural waters // *Contemporary Problems of Ecology*. 2010. V. 3. No. 3. P. 265–271. doi: 10.1134/S1995425510030021
3. Minayeva T.Yu., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // *Mires and Peat*. 2017. V. 19. Article No. 01. P. 1–36. doi: 10.19189/MaP.2013.OMB.150
4. Vartapetov L.G., Adam A.M. Landscape and ecological features of the formation of the fauna of the Bolshoe Vasyuganskoe mire // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2010. No. 1. P. 83–89 (in Russian).
5. Spitzer K., Bezděk A., Jaroš J. Ecological succession of a relict Central European peat bog and variability of its insect biodiversity // *Journal of Insect Conservation*. 1999. V. 3. No. 2. P. 97–106. doi: 10.1023/A:1009634641130.
6. Boyce D.C. A review of the invertebrate assemblage of acid mires // *English Nature Research Reports*. 2004. No. 592. P. 1–109.
7. Spitzer K., Danks H.V. Insect biodiversity of Boreal peat bogs // *Annual Review of Entomology*. 2006. V. 51. P. 137–161. doi: 10.1146/annurev.ento.51.110104.151036
8. Spungis V. Fauna and ecology of terrestrial invertebrates in raised bog in Latvia. Riga, 2008. 80 p.
9. Tatarinov A.G., Kulakova O.I. Long-term population structure dynamics of rhopalocera lepidopterous insects (Lepidoptera, Papilionoidea, Hesperioidea) of peat moss bogs // *Theoretical and Applied Ecology*. 2009. No. 2. P. 66–74 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-2-066-074
10. Noreika N., Pajunen T., Kotze D.J. Urban mires as hotspots of epigeic arthropod diversity // *Biodiversity and Conservation*. 2015. V. 24. P. 2991–3007. doi: 10.1007/s10531-015-0990-9
11. Prokin A.A., Sazhnev A.S., Philippov D.A. Water beetles (Insecta: Coleoptera) of some peatlands of the North Caucasus // *Nature Conservation Research*. 2019. V. 4. No. 2. P. 57–66. doi: 10.24189/ncr.2019.016

12. Kozlovskaya L.S. The role of invertebrates in the transformation of organic matter in peatlands soils. Leningrad: Nauka, 1976. 212 p. (in Russian).
13. Pelletier L., Brown A., Otrysko B., McNeil J.N. Entomophily of the cloudberry (*Rubus chamaemorus*) // Entomologia Experimentalis et Applicata. 2001. V. 101. No. 3. P. 219–224. doi: 10.1046/j.1570-7458.2001.00906.x
14. Dlusski G.M., Glazunova K.P., Perfilieva K.S. Mechanisms that limit pollinator range in Ericaceae // Zhurnal obshchey biologii. 2005. V. 66. No 3. C. 224–238 (in Russian). doi: 10.1046/j.1570-7458.2001.00906.x
15. Egren J., Elmqvist T., Tunlid A. Pollination by deceit, floral sex ratios and seed set in dioecious *Rubus chamaemorus* L. // Oecologia. 1986. V. 70. P. 332–338. doi: 10.1007/BF00379493
16. Uzenbaev S.D. Ecology of carnivorous arthropods of a mesotrophic mire. Petrozavodsk: Karel'skiy filial AN SSSR, 1987. 128 p. (in Russian).
17. Sushko G.G. Diversity and species composition of beetles in the herb-shrub layer of a large isolated raised bog in Belarus // Mires and Peat. 2017. V. 19. Article No. 10. P. 1–14. doi: 10.19189/MaP.2017.OMB.266
18. Sushko G.G. Effect of vegetation cover on the abundance and diversity of ladybirds (Coccinellidae) assemblages in a peat bog // Biologia. 2018. V. 73. No. 4. P. 371–377. doi: 10.2478/s11756-018-0045-2
19. Sushko G. Spatial variation in assemblages of Odonata (Insecta) within habitat gradients in large, pristine peat bogs in Belarus // Biologia. 2021. V. 76. No. 2. P. 575–583. doi: 10.2478/s11756-020-00558-z
20. Philippov D.A., Pestov S.V. Preliminary checklist of insects of mire biotopes of the Vologda Region // Trudy Instorfa. 2014. No. 10. P. 3–19 (in Russian).
21. Ivicheva K.N., Philippov D.A. Aquatic macroinvertebrates of raised bogs in the central part of the Vologda Region, Russia // Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2017. No. 9. P. 30–45 (in Russian). doi: 10.17076/eco472
22. Sazhnev A.S., Ivicheva K.N., Komarova A.S., Philippov D.A. A review of aquatic, semi-aquatic and amphibiotic beetles (Insecta: Coleoptera) of Vologodskaya Oblast, Russia // Euroasian Entomological Journal. 2019. V. 18. No. 1. P. 60–74 (in Russian). doi: 10.15298/euroasentj.18.1.08
23. Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T., Kuznetsov O., Smagin V., Fedotov Yu. Russian Federation (European Part) // Mires and peatlands of Europe: Status, distribution and conservation / Eds. H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen. Stuttgart, 2017. P. 589–616. doi: 10.1127/mireseurope/2017/0001-0049
24. Philippov D.A. Flora of wetland «Shichenskoe» (Vologda Region, Russia) // Phytodiversity of Eastern Europe. 2015. V. 9. No. 4. P. 86–117 (in Russian). doi: 10.24411/2072-8816-2015-10033
25. Golub V.B., Tsurikov M.N., Prokin A.A. Collections of insects: collecting, handling and keeping of the material. Moskva: KMK, 2012. 339 p. (in Russian).
26. Philippov D.A., Yurchenko V.V. Data on air temperature, relative humidity and dew point in a boreal *Sphagnum* bog and an upland site (Shichenskoe mire system, North-Western Russia) // Data in Brief. 2019. V. 25. Article No. 104156. doi: 10.1016/j.dib.2019.104156
27. Slawska M. Collembola communities in Sphagnum basin bogs and their importance to biodiversity of pine forest // Pedobiologia. 2000. V. 44. P. 413–420. doi: 10.1016/j.dib.2019.104156

Изменение ростовых процессов европейского хариуса тиманского водотока в условиях неконтролируемой эксплуатации

© 2021. Э. И. Бознак, к. б. н., н. с., А. Б. Захаров, к. б. н., с. н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: boznak@ib.komisc.ru, zakharov@ib.komisc.ru

В работе проведён ретроспективный анализ динамики линейного роста европейского хариуса одного из водотоков Среднего Тимана (р. Вымь, бассейн р. С. Двина), обитающего в условиях длительной иррациональной эксплуатации. Быстрый линейный рост хариуса свидетельствует о сохранении благоприятных условий среды обитания. По сравнению с данными 1970–1990-х годов, у рыб из поколений, сформировавшихся в условиях интенсивного неконтролируемого рыболовства (2003–2012 гг. рождения), на втором-четвертом году жизни происходит увеличение расчисленных длин тела, абсолютных приростов и удельной скорости роста. Далее темп роста снижается, и в течение последующих 5 лет эти показатели существенно не различаются. Замедление роста, по-видимому, связано с селективным изъятием из популяции быстрорастущих рыб, раньше достигающих промысловых размеров. Эти изменения сопровождается ускорением полового созревания. Значимой корреляции между среднегодовыми температурами и длиной тела рыб не обнаружено, стабильной остаётся кормовая база хариуса. Таким образом, основной причиной ускорения роста и полового созревания хариуса верхнего течения р. Вымь является длительная переэксплуатация рыбного населения, не связанная с загрязнением природной среды.

Ключевые слова: европейский хариус, линейный рост, половое созревание, некоммерческое рыболовство, переэксплуатация.

The changes in growth processes of the European grayling from the Timan stream in conditions of non-controlled exploitation

© 2021. E. I. Boznak ORCID: 0000-0001-7049-1472
A. B. Zakharov ORCID: 0000-0002-8924-9384

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

The work deals with the retrospective analysis of linear growth dynamics for the European grayling in one of the Middle Timan streams (the Vym' River, the Northern Dvina basin) under continuous unsustainable exploitation. The European grayling grows relatively fast indicating favorable environmental conditions. In contrast with the data of 1970–1990s, the specimens from generations formed in unsustainable fishing years (born in 2003–2012) increase in the calculated body length value (by 15%), absolute increments (by 19%), and specific growth rate (on the second-fourth living year – by 12%). Then, the grow rate slows down. The following five years do not much differ by the considered parameters. The growth slowdown seems to be related to the active commercial catching of quickly-growing fish specimens as they early reach the right size. The accelerated growth processes are accompanied by accelerated sexual development. The grayling normally becomes mature on the fifth-sixth living year (in 1980–1990s). From the early 2000s, we regularly face sexually mature four-year-old (3+) specimens. There are no true correlation between mean annual temperatures and body length of five-to-seven year old specimens. The food resources of grayling also hold stable. Thus, the continuous over-exploitation of fish population results in visible changes in population parameters (population decrease, age structure degradation) and invisible aftereffects (growth and sexual maturation acceleration).

Keywords: the European grayling, linear growth, sexual maturation, non-commercial fishing, over-exploitation.

Хозяйственная деятельность сопровождается не только антропогенным преобразованием природных ландшафтов, но и усилением эксплуатационной нагрузки на водные биологические ресурсы. Интенсивный вылов часто является одним из важнейших

экологических факторов, определяющих уровень смертности и скорость пополнения группировок хозяйственно ценных видов рыб [1]. В результате могут изменяться структурные параметры эксплуатируемой популяции (пространственная, возрастная и половая структуры) и биологические особенности составляющих её особей (скорость роста, темпы полового созревания и т. д.). Все это приводит к увеличению флуктуации биомассы [2, 3], снижению разнообразия и продуктивности, негативно сказываясь на устойчивости, как отдельных популяций, так и всего рыбного населения [4–6].

Рост является одним из важнейших свойств любого организма, он представляет собой интегральный результат сложного взаимодействия генотипа со всем комплексом факторов среды обитания [7]. Всё это позволяет рассматривать параметры роста в качестве важного индикатора состояния окружающей среды, использовать их при оценке продуктивности водоёма, учитывать при разработке мер, направленных на охрану и рациональное использование рыбных ресурсов [8].

На сегодняшний день освоение Среднего Тимана преимущественно связано с разведкой и добычей минеральных полезных ископаемых. Однако развитие транспортной инфраструктуры, способствующей доступности водоёмов, возрастание технической вооружённости рыбаков и неэффективная система охраны рыбных запасов привели к резкому усилению неkomмерческого (часто нелегального) рыболовства [9]. В первую очередь это отразилось на состоянии популяций лососеобразных рыб, составляющих основу рыбного населения большинства тиманских водотоков, где одним из видов рыб, формирующих промысловые запасы, является европейский хариус *Thymallus thymallus* L.

Цель работы – на основе анализа изменения основных параметров роста описать реакцию группировки европейского хариуса верхнего течения р. Вымь на длительную иррациональную эксплуатацию.

Материал и методы исследования

В работе использован материал, накопленный во время выполнения ихтиологических исследований, проведённых в 1980–1990-е годы, и последующего (начиная с 2001 г.) рыбохозяйственного мониторинга верхнего течения р. Вымь (крупнейший тиманский приток бассейна р. Северная Двина), расположенного

в зоне производственной деятельности Средне-Тиманского бокситового рудника.

В ходе работы было проанализировано 2359 экз. хариуса, отловленного из верхнего течения р. Вымь с 1982 по 2018 гг. Биологический анализ проводили по стандартной методике [10, 11]. Массу тела рыб определяли с точностью до 1 г, длину тела по Смитту (АС) – с точностью до 1 мм. Чешую для определения возраста собирали из первого-второго чешуйного ряда над боковой линией, позади от вертикали, проведённой от заднего края спинного плавника. Определение возраста и измерения чешуи проведены при помощи бинокля (увеличение 2 × 8). Ретроспективный анализ роста рыб выполнен методом обратного расчисления по формуле прямой пропорциональности Э. Леа, позволяющим достаточно точно характеризовать рост отдельной особи [7]. Для снижения погрешностей, возникающих при определении возраста и оценке роста, все измерения проделаны одним оператором. На основе полученных данных для каждой особи были рассчитаны абсолютные приросты длины тела и удельные скорости линейного роста по формуле Шмальгаузена-Броди [7, 12].

Результаты и обсуждение

Хариус верхнего течения р. Вымь характеризуется сравнительно быстрым линейным ростом, отставая по этому показателю лишь от быстрорастущих особей из некоторых водотоков бассейна р. Печора (рис. 1), что свидетельствует о благоприятных условиях среды обитания и хорошем состоянии кормовой базы данного вида рыб. Линейный рост одновозрастных самцов и самок отличался незначительно (различия расчисленных длин составили в среднем около 4%), что позволяет использовать для дальнейшего анализа материал без учёта пола.

Материалы, накопленные в ходе многолетних наблюдений, позволяют охарактеризовать рост хариуса, в течение всей жизни обитавшего в условиях, когда верховья р. Вымь оставались труднодоступными (поколения 1977, 1989, 1990 и 1993 гг.) с данными, характеризующими генерации (2003–2012 гг.), сформировавшиеся в условиях низкой численности [16], вызванной воздействием неконтролируемого рыболовства.

К концу первого года жизни рыбы из разных генераций характеризуются практически одинаковой расчисленной длиной тела. Достоверной корреляции между этим показателем

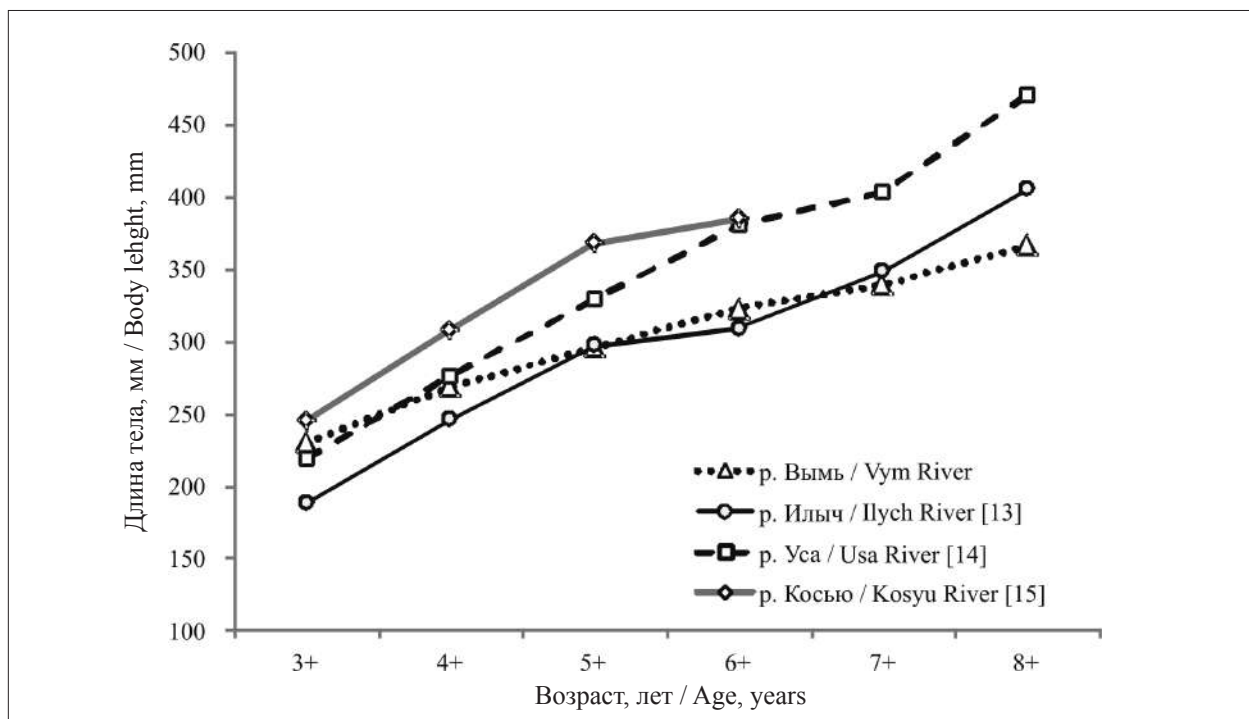


Рис. 1. Линейный рост хариуса из разных водотоков по наблюдаемым данным
Fig. 1. Linear growth of grayling from different rivers according to the observed data

и динамикой среднегодовых температур не обнаружено. На втором-четвёртом году у рыб поколений 2003–2012 гг. происходит заметное ускорение роста. На момент закладки третьего годового кольца это опережение достигает 23 мм (18% длины тела). Далее наблюдается постепенное замедление роста и к концу 8 года жизни они уже заметно (на 33 мм или 10% расчисленной длины тела) отстают от особей, весь жизненный цикл которых протекал в условиях низкой интенсивности рыболовства (рис. 2а, б). Всё это хорошо согласуется с результатами анализа абсолютных годовых приростов и удельной скорости роста. Наибольшее ускорение роста в генерациях 2003–2012 гг. отмечается на втором-третьем году жизни, далее наблюдается постепенное снижение темпа роста и на 6–9 годах жизни величины этих показателей достоверно не отличаются (рис. 2с).

Анализ полученных данных демонстрирует отсутствие значимой корреляции (по Спирмену) между среднегодовыми температурами воздуха (по данным www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=23606), определяющими продолжительность периода нагула рыб, и средней длиной тела хариуса, отловленного в верхнем течении р. Вынь в разное время (для возрастной группы 4+ $\rho_s = -0,01, p = 0,51$; 5+ – $\rho_s = 0,23, p = 0,76$; 6+ – $\rho_s = 0,38, p = 0,84$).

Достаточно стабильной остается и кормовая база: средняя биомасса бентоса на контрольных участках в 2000 г. составила 6,5 г/м², в 2008 г. – 3,5 г/м², в 2015 г. – 5,8 г/м². Следовательно, ускорение роста, по-видимому, не связано с изменением температурного режима и состоянием кормовой базы.

Другим фактором, воздействующим на рост рыб, является рыболовство. Влияние интенсивного вылова на рост промысловых видов обычно связывают с разрежением популяции, повышающим обеспеченность пищей, что в свою очередь может приводить к ускорению роста и полового созревания оставшихся особей [17, 18]. С другой стороны, вылов воздействует на популяцию как фактор отбора, предоставляющий селективное преимущество быстро созревающим рыбам [19–21]. В условиях интенсивного изъятия такие особи с большей вероятностью участвуют в размножении, обеспечивая воспроизводство популяции [22, 23].

Действительно, у хариуса младших возрастных групп (3+–5+), отловленного в верхнем течении р. Вынь после 2002 г. (в условиях интенсивной эксплуатации), наблюдается ускорение линейного роста (табл.) и сокращение сроков наступления половозрелости (рис. 3). Так, если в 1980–1990-х гг. созревание хариуса проходило на пятом-шестом году

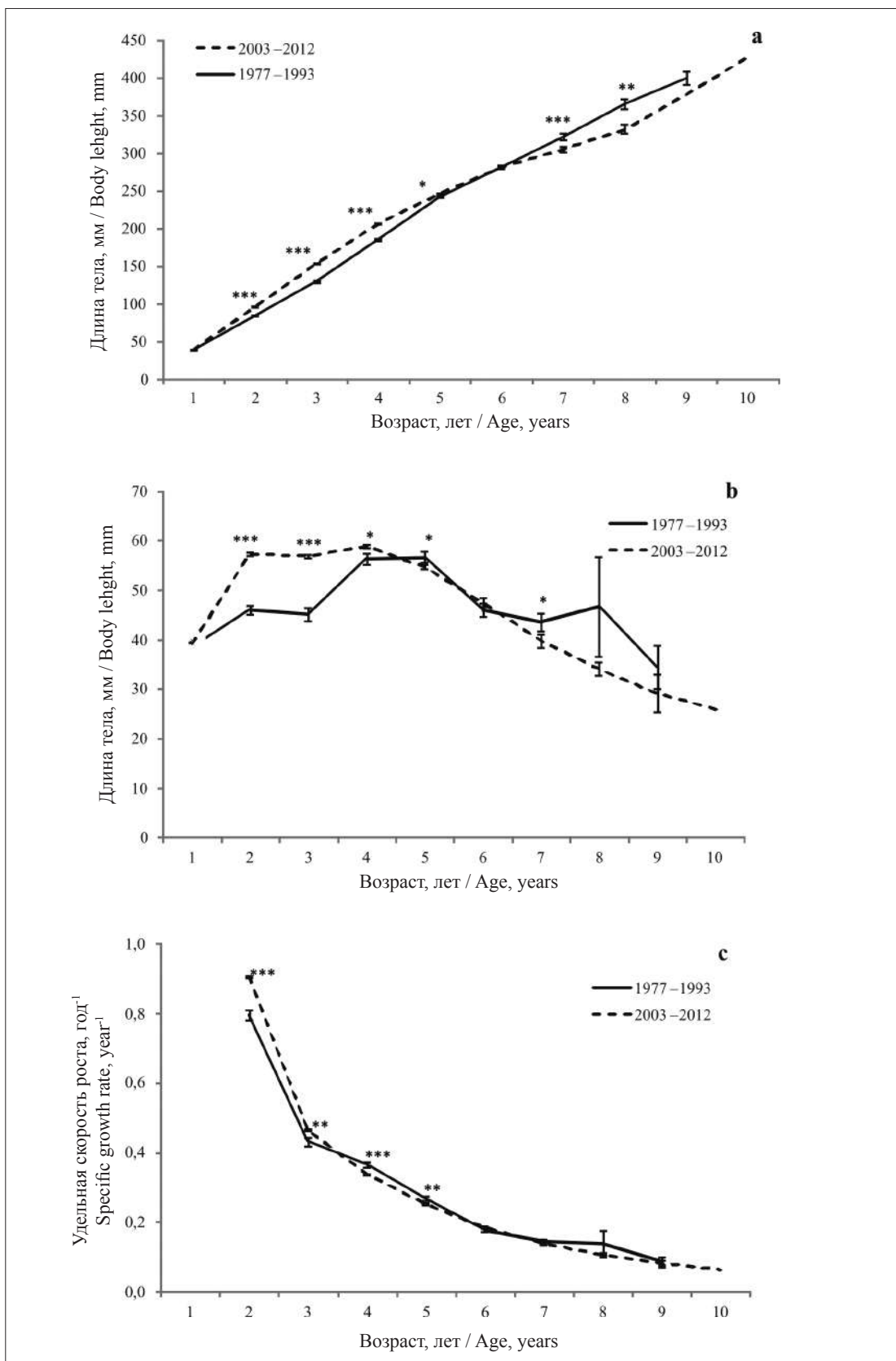


Рис. 2. Линейный рост (а), абсолютные приросты (b) и удельная скорость роста (с) хариуса р. Вымь, генерации которого сформировались в условиях разной интенсивности эксплуатации. Достоверность различий по критерию Стьюдента: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Fig. 2. Linear growth (a), absolute increments (b) and specific growth rate (c) of grayling generations of the Vym' river, formed under different intensity of exploitation. The significance of differences by Student's criterion: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

Таблица / Table

Линейный рост хариуса верхнего течения р. Вымь, рассчитанный для рыб разных возрастных групп
 Linear growth of the Vym river grayling calculated for fish of different age group

Возраст Age	Годы вылова Catch date	n	Расчётная длина тела, мм / Back-calculated body lengths, mm							
			L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
3+	1982	12	37±1,8	95±3,5	172±2,7					
	2009–2018	325	43±0,4*	110±0,7*	175±0,9					
4+	2000–2002	33	37±1,2	94±2,3	159±3,0	232±3,6*				
	2005–2018	753	40±0,2*	98±0,5	158±0,6	221±0,7				
5+	1982	39	42±1,0	84±2,0	130±2,5	184±2,4	249±2,2			
	2002–2018	438	37±0,3*	89±0,6*	140±0,9*	197±1,0*	253±1,1			
6+	1990	21	39±1,1*	82±3,2	142±3,9	195±3,3	240±4,1	290±4,4		
	2007–2015	151	36±0,5	86±1,0	137±1,4	188±1,8	239±1,9	288±1,9		
7+	1989	46	39±1,0*	88±1,7*	121±2,0	179±3,0	233±3,1*	277±3,6*	320±4,3*	
	2011	21	34±1,2	79±2,1	124±3,8	170±4,7	213±5,1	257±5,0	296±5,2	

Примечание: достоверность различий по критерию Стьюдента: * p < 0,05.
 Note: the significance of differences by Student's criterion: * p < 0.05.

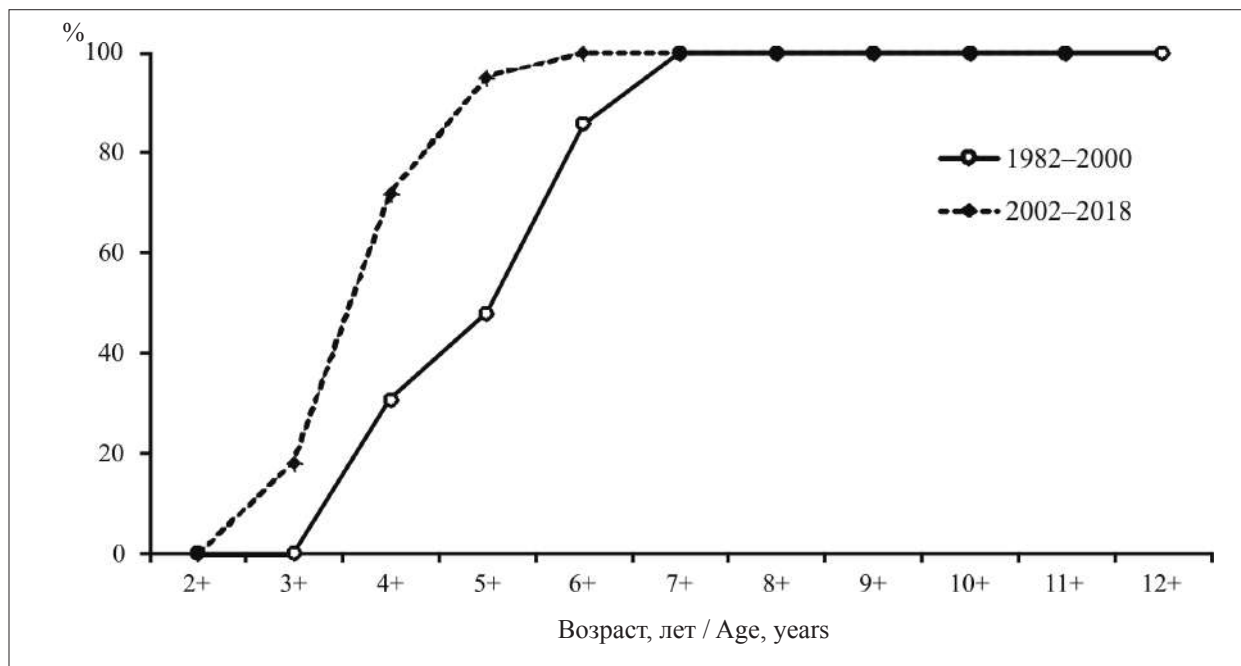


Рис. 3. Динамика полового созревания хариуса верхнего течения р. Вымь, по данным разных лет наблюдений
 Fig. 3. Dynamics of sexual maturation of the grayling in the upper reaches of the Vym' river, according to different years of observations

жизни (возраст 4+–5+), то с начала 2000-х годов достаточно регулярно встречаются половозрелые четырехлетние (3+) особи, а в группе шестилетних рыб (5+) доля созревших особей составляет практически 95%.

Как правило, такие быстро созревающие рыбы впоследствии замедляют свой рост [7], что хорошо согласуется с описанным выше снижением скорости роста хариуса, принад-

лежащего к старшим возрастным группам (рис. 2). Кроме того, в ходе отлова происходит селективное изъятие из популяции быстрорастущих рыб, раньше достигающих промысловых размеров [23]. В результате, не смотря на возможность компенсационного роста [12, 24–26], старшие возрастные классы (7+ и старше) оказываются сформированными из относительно медленно растущих особей.

Таким образом, рост эксплуатационной нагрузки на популяцию хариуса верхнего течения р. Вымь, происходящий с начала 2000-х гг., сопровождается повышением темпа линейного роста рыб младших возрастных групп и сокращением сроков их полового созревания. Тем не менее, разрежение популяции не привело к качественному изменению скорости роста, т. е. в современных условиях хариус практически полностью реализует свой ростовой потенциал.

В целом, это согласуется с результатами анализа влияния вылова на скорость роста рыб в популяциях, подверженных интенсивному промыслу. Действительно, промысловое изъятие далеко не всегда может приводить к ускорению роста, более общим его результатом является сокращение возраста и длины тела при котором происходит половое созревание [27]. Этот факт может расцениваться и как признак чрезмерного вылова: «...у всех популяций рыб повышение интенсивности рыболовства вызывает нарастание темпа роста и плодовитости лишь до определённых пределов, после чего, если интенсивность рыболовства превзойдет определённую, специфичную для каждого вида величину, регуляторные механизмы популяции нарушаются, и она перестает реагировать на дальнейшее разреживание стада, что является очень серьёзным сигналом перелова» [48, с. 247].

Заключение

Длительная переэксплуатация рыбных ресурсов (при отсутствии заметных нарушений природной среды), приводит не только к снижению численности и деградации возрастной структуры эксплуатируемой популяции, но и сказывается на темпе роста и скорости полового созревания составляющих её особей. Хариус, обитающий в верхнем течении р. Вымь, характеризуется быстрым линейным ростом, свидетельствующим о благоприятных условиях обитания этого вида рыб. Разрежение популяции хариуса, вследствие усиления неконтролируемого рыболовства, привело к ускорению линейного роста рыб в период, предшествующий половому созреванию. Снижение скорости роста хариуса, принадлежащего к старшим возрастным группам, может быть связано с селективным изъятием из популяции потенциально быстрорастущих особей. Отмеченные изменения ростовых показателей, наряду с омоложением возрастного состава и снижением численности, свидетель-

ствует о напряжённом состоянии группировки хариуса верхнего течения р. Вымь, что может негативно отразиться на устойчивости как отдельно взятой популяции, так и всего рыбного населения, потери его репродукционного и ресурсного потенциала.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Распространение, систематика и пространственная организация фауны и населения животных таёжных и тундровых ландшафтов и экосистем европейского северо-востока России» № АААА-А17-117112850235-2.

References

1. Berkeley S.A., Hixon M.A., Larson R.J., Love M.S. Fisheries sustainability via protection of age structure and spatial distribution of fish populations // *Fisheries*. 2004. V. 29. P. 23–32. doi: 10.1577/1548-8446(2004)29[23:FSVPOA]2.0.CO;2
2. Hsieh C.H., Reiss C.S., Hunter J.R., Beddington J.R., May R.M., Sugihara G. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species // *Nature*. 2006. V. 443. P. 859–862. doi: 10.1038/nature05232
3. Anderson C.N.K., Hsieh C.H., Sandin S.A., Hewitt R., Hollowed A., Beddington J., May R.M., Sugihara G. Why fishing magnifies fluctuations in fish abundance // *Nature*. 2008. V. 452. P. 835–839. doi: 10.1038/nature06851
4. Barnett L.A.K., Branch T.A., Ranasinghe A.R., Essington T.E. Old-growth fishes become scarce under fishing // *Current Biology*. 2017. V. 27. P. 2843–2848. doi: 10.1016/j.cub.2017.07.069
5. Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folkes C., Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems // *Nature*. 2001. V. 413. P. 591–596. doi: 10.1038/35098000
6. Hsieh C.-H., Yamauchi A., Nakazawa T., Wang W.-F. Fishing effects on age and spatial structures undermine population stability of fishes // *Aquatic Science*. 2010. V. 72. P. 165–178. doi: 10.1007/s00027-009-0122-2
7. Dgebuadze Yu. Yu. Ecological aspects of fish growth variability. Moskva: Nauka, 2001. 276 p. (in Russian).
8. Zubova E.M., Kashulin N.A., Terent'ev P.M., Denisov D.B., Val'kova S.A. Linear growth of sparsely raked whitefish *Coregonus lavaretus* (Coregonidae) of the Imandra Lake (Murmansk oblast) // *Journal of Ichthyology*. 2016. V. 56. No. 4. P. 588–599. doi: 10.1134/S0032945216040172
9. Zaharov A.B., Taskaev A.I. Problems of conservation and restoration of aquatic biological resources of the Central Timan rivers // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 2. P. 83–91 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-2-083-091
10. Pravdin I.F. Guide to the study of fish. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1966. 376 p. (in Russian).

11. Sidorov G.P., Reshetnikov Yu.S. Salmonid fish of the European Northeast water bodies. Moskva: KMK, 2014. 346 p. (in Russian).
12. Mina M.V., Klevezal G.A. The growth of animals. Moskva: Nauka, 1976. 291 p. (in Russian).
13. Nikolsky G.V., Gromchevskaya N.A., Morozova G.I., Pikuleva V.A. Fish in the upper Pechora basin. Moskva: MOIP, 1947. V. 6 (XXI). P. 5–203 (in Russian).
14. Solovkina L.N. Fishes of the middle and lower reaches of the Usa River // Fishes of the Usa River Basin and their food resources. Moskva-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962. P. 88–135 (in Russian)
15. Kuchina E.S. Ichthyofauna of tributaries of the Usa River // Fish of the Usa River Basin and their food resources. Moskva-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962. P. 176–211 (in Russian).
16. Boznak E.I., Zakharov A.B., Tereshchenko V.G. Effect of the increasing intensity of recreational fishing on the fish assemblage of a watercourse in an economic development zone // Inland Water Biology. 2019. V. 12. No. 1. P. 88–95. doi: 10.1134/S199508291901005X
17. Kotenev B.N., Kuznetsova E.N., Bondarenko M.V. Investigation of age composition and growth of cod *Gadus morhua morhua* of the Barents Sea in connection with the estimation of its stocks state // Journal of Ichthyology. 2009. V. 49. No. 1. P. 47–55. doi: 10.1134/S0032945209010068
18. Nikolsky G.V. The theory of fish stock dynamics as a biological basis for rational exploitation and reproduction of fish resources. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1974. 447 p. (in Russian).
19. Borisov V.M. The selective effect of fishing on the structure of the population of long-cycle fish // Voprosy ichthyology. 1978. V. 18. No. 3. P. 1010–1019 (in Russian).
20. Enberg K., Jrgensen C., Dunlop E.S, Varpe Ø., Boukal D.S., Baulier L., Eliassen S., Heino M. Fishing-induced evolution of growth: concepts, mechanisms and the empirical evidence // Marine Ecology. 2012. V. 33. P. 1–25. doi: 10.1111/j.1439-0485.2011.00460.x
21. Murawski S.A., Rago P.J., Trippel E.A. Impacts of demographic variation in spawning characteristics on reference points for fishery management // ICES Journal of Marine Science. 2001. V. 58. P. 1002–1014. doi: 10.1006/jmsc.2001.1097
22. Naish K.A., Hard J.J. Bridging the gap between the genotype and the phenotype: linking genetic variation, selection and adaptation in fishes // Fish and Fisheries. 2008. V. 9. P. 396–422. doi: 10.1111/j.1467-2979.2008.00302.x
23. Swain D.P., Sinclair A.F., Mark Hanson J. Evolutionary response to size-selective mortality in an exploited fish population // Proceedings. Biological Sciences. 2007. V. 274. No. 1613. P. 1015–1022. doi: 10.1098/rspb.2006.0275
24. Ivanova M.N., Svirskaya A.N. Size hierarchy in young pike *Esox lucius* // Journal of Ichthyology. 2013. V. 53. No. 5. P. 333–346. doi: 10.1134/S0032945213030041
25. Ali M., Nicieza A., Wootton R.J. Compensatory growth in fishes: a response to growth depression // Fish and Fisheries. 2003. V. 4. P. 147–190. doi: 10.1046/j.1467-2979.2003.00120.x
26. Metcalfe N.B., Monaghan P. Compensation for a bad start: grow now, pay later? // Trends in Ecology & Evolution. 2001. V. 16. P. 254–260. doi: 10.1016/S0169-5347(01)02124-3
27. Hilborn R., Minte-Vera C.V. Fisheries-induced changes in growth rates in marine fisheries: are they significant? // Bulletin of Marine Science. 2008. V. 83. P. 95–105.

Особенности выделения высоких природоохранных ценностей типа «Редкие экосистемы и местообитания» для сертификации лесов Кировской области

© 2021. Н. П. Савиных, д. б. н., профессор, с. н. с.,
С. В. Шабалкина, к. б. н., с. н. с.,
О. Н. Пересторонина, к. б. н., доцент, с. н. с.,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: savva_09@mail.ru

Одним из современных требований лесопользования является сохранение биоразнообразия путём выделения высоких природоохранных ценностей (ВПЦ), особенно редких экосистем и местообитаний (тип ВПЦ 3). На основании системного и регионального подходов усовершенствована методология определения подтипов ВПЦ 3 и создана система их в Кировской области с распределением на классы и уровни. Класс Пихтово-еловые леса включает два уровня, Сосновые леса и Леса с участием широколиственных пород – по три. Классы Лиственничные и Чёрноольховые леса, Старовозрастные осинники на уровне не подразделены. У каждого ВПЦ 3 описаны состав древостоя, возраст преобладающей породы, особенности видового состава травяно-кустарничкового яруса, природоохранная ценность и рекомендуемые режимы охраны и лесопользования; определены необходимые критерии для оценки лесопользования, мониторинга и соответствия лесохозяйственной деятельности международным стандартам. Использование предлагаемых материалов обеспечит сохранение биоразнообразия эксплуатационных лесов, соблюдение требований Национального стандарта FSC для Российской Федерации при лесопользовании, позиционирование Кировской области как поставщика качественной древесины.

Ключевые слова: высокие природоохранные ценности, биоразнообразие, редкий вид, редкое сообщество, экосистема, режим лесопользования.

Features of the allocation of high conservation values of type “Rare ecosystems and habitats” for certification of forests of the Kirov region

© 2021. N. P. Savinykh ORCID: 0000-0003-4996-8269
S. V. Shabalkina ORCID: 0000-0002-6157-1312
O. N. Perestoronina ORCID: 0000-0002-1051-2195
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: savva_09@mail.ru

One of the modern requirements of forest management is the conservation of biodiversity by identifying forests with high conservation value (HCV), especially rare ecosystems and habitats (HCV type 3). Based on the systemic and regional approaches, the methodology for determining HCV 3 has been improved and a system has been created in the Kirov region with the distribution into classes and levels. The class of Fir-spruce forests includes two levels – large-fern with the presence of nemoral elements and tall grasses; with the presence of rare and vulnerable species. The class of Pine forests is divided into sphagnum with the presence of rare and vulnerable species, lichen (with steppe elements) and heather. The Forest class with the participation of broad-leaved species has three levels – linden and multi-species forests in the subzones of the middle and southern taiga of the Kirov region, oak forests (including the subzone of mixed forests). The classes of Larch and Black alder forests, Old-aged aspens are not subdivided into levels. The composition of the stand, the age of the prevailing species of the stand, the species composition of the grass-shrub layer, the conservation value and the recommended conservation and forest management regimes each HCV 3 describes; necessary criteria for assessing forest management, monitoring and compliance of forestry activities with international standards are identified. The developed system is not final; it can be supplemented and expanded due to newly emerging data. The use of the proposed materials will ensure the conservation of biodiversity of production forests, compliance with the requirements of the National FSC Standard of the Russian Federation for forest management, and positioning of the Kirov region as a supplier of quality wood.

Keywords: high conservation value, biodiversity, rare species, rare community, ecosystem, forest management regime.

Одна из приоритетных задач современного лесопользования и лесопользования – рациональная и эффективная лесохозяйственная деятельность с сохранением биоразнообразия [1–5], жизнеспособности лесных экосистем и функций леса [6, 7]. Существенное значение в этом имеют программы, системы и схемы сертификации лесной продукции, которых сегодня разработано немало [8]. В Российской Федерации (РФ) большое распространение получила добровольная сертификация по системе Лесного попечительского совета (ЛПС, FSC). Девятый принцип утверждённого 10 августа 2020 г. Национального стандарта FSC для РФ [9] гласит, что организация должна поддерживать и/или улучшать высокие природоохранные ценности (ВПЦ) в пределах единицы управления в контексте подхода принятия мер предосторожности. В зависимости от состава и природоохранной значимости определено 6 типов ВПЦ со своими подтипами [9], выявление которых должно быть проведено до начала хозяйственной деятельности на территории управляемого участка. Однако перед лесозаготовителями и природоохранными организациями стоит проблема отсутствия согласованных объективных признаков и нормативов выделения таких ценностей, в том числе и ВПЦ 3.

К ВПЦ 3 относятся редкие, находящиеся под угрозой исчезновения или исчезающие экосистемы, которые занимают незначительную площадь в составе ландшафта, региона, природной зоны или в международном масштабе в силу уникальных естественно-исторических процессов, или в результате влияния человека. Такие экосистемы являются уязвимыми, находятся под угрозой потери и могут быть полностью утрачены.

Общероссийского списка редких экосистем не разработано. При этом в Российском национальном стандарте добровольной лесной сертификации по схеме FSC (FSC-STD-RUS-V6-1-2012), утверждённом 11.11.2008 г., отмечено: 1) во всех регионах Европейской России редкими являются кленовые и ясеневые леса, а также леса с заметным участием *Quercus* L.; леса с участием *Larix* Mill. в древостое и/или подросте; 2) во всех регионах Европейской России и Урала редкими являются тёмнохвойные (еловые, пихтово-еловые, пихтовые) леса с участием неморальных трав и/или видов бореального высокоотравья; 3) во всех регионах редкими являются старовозрастные чёрноольховые леса и смешанные пойменные леса с доминированием *Populus* L. (любые виды) [10].

Поэтому в разных регионах РФ специалисты разрабатывают подходы выделения ВПЦ 3, конкретизируют типы, признаки и методы определения таких участков, приводят подробную характеристику [11–16]. В Кировской области впервые описаны [10] 13 редких лесных экосистем (РЛЭ) на основе главным образом состава древостоя и возраста преобладающей породы. При характеристике отдельных сообществ учтены тип леса, особенности подлеска, возобновления растений, наличие отдельных специфических видов. Тем не менее выделение некоторых предложенных РЛЭ вызывает затруднение.

В связи с этим цель данной работы – усовершенствовать методологию выделения ВПЦ 3 в рамках системы добровольной лесной сертификации FSC, в том числе – в Кировской области. Соответственно поставлены задачи: определить редкие и находящиеся под угрозой исчезновения лесные сообщества Кировской области; охарактеризовать и обосновать их высокую природоохранную ценность; разработать критерии их выделения по лесостроительной документации и на основе полевых исследований; предложить режим охраны и возможного лесопользования в таких сообществах.

Методология исследования

Категории ВПЦ 3 выделены согласно двум основным подходам: 1) системный – рассматривается целостное сообщество с учётом не только древесного, но и травяно-кустарничкового ярусов; автотрофные и гетеротрофные элементы; 2) региональный – учитываются история формирования лесных экосистем; ботанико-географическое и лесорастительное районирование; степень антропогенного воздействия; способность сообществ к естественному восстановлению.

В ходе работы использованы методы: 1) анализ таксационных описаний (ООО «Нолинская лесопромышленная компания», «Сорвижи-лес», «Берёзка», «Форест» и др.); 2) анализ результатов собственных полевых работ на арендных участках указанных обществ и при других комплексных исследованиях лесных экосистем в течение последних 20 лет в Кировской области; 3) комплексный анализ полученных данных.

Для большей репрезентативности ВПЦ 3 при их выделении с позиций системного подхода использовано наиболее возможное число критериев и предложены соответствующие их

варианты: 1) происхождение и степень антропогенного воздействия – леса естественного происхождения без антропогенного воздействия в течение 120 лет или восстановившиеся в ходе вторичной сукцессии; 2) способность к естественному восстановлению; 3) состав древостоя и возраст; 4) местообитание сообщества по градиенту влажности; 5) месторасположение (пойменные или водораздельные леса); 6) наличие популяций редких и уязвимых видов растений, грибов и животных; видов, нетипичных для природной подзоны.

В связи с тем, что на отдельных, даже охраняемых территориях, сохранение биоразнообразия невозможно без определённых видов лесохозяйственной деятельности [17, 18], в ряде ВПЦ 3 мы рекомендуем обоснованный режим лесопользования.

Результаты и обсуждение

Современная растительность Кировской области сформировалась в последние 10–15 тыс. лет назад после отступления валдайского ледника на основе существовавших ранее богатых по составу широколиственных лесов. В период оледенения некоторые виды оставались в так называемых убежищах (рефугиумах). Позднее они распространились по территории, но представлены лишь в отдельных типах современных лесов. В местах бывших тундр, прилегающих к леднику, в настоящем – на болотах центральной части области и даже в некоторых южных районах, присутствуют тундровые виды как *Rubus chamaemorus* L., *Ledum palustre* L., *Betula nana* L. и др. На юге области, преимущественно в сосняках, сохранились от притундровых лесостепей и мигрировавшие с юга отдельные степные растения (*Gypsophila paniculata* L., *Dracocephalum ruyschiana* L., *Centaurea sumensis* Kalen. и др. – всего около 30 видов) и животные. На севере вместе с *Pinus sylvestris* L. распространился с запада *Calluna vulgaris* (L.) Hull. Поэтому в вятских лесах присутствуют не только типичные виды еловых лесов, но и представители широколиственных лесов, тундр и степей [19]. Многие из них находятся на границах ареалов и внесены в Красные книги РФ [20] и Кировской области [21]: тундровые – *Empetrum nigrum* L., *Saxifraga hirculus* L.; широколиственных лесов – *Lilium martagon* L., *Thalictrum aquilegifolium* L.; степные – *Pulsatilla flavescens* (Zuccar.) Juz., *Dianthus arenarius* L., *Dianthus borbasii* Vandas и другие.

Согласно ботанико-географическому районированию [22], северная и централь-

ная части Кировской области расположены в средней и южной подзонах таёжной зоны, южная – в подзоне смешанных (хвойно-широколиственных) лесов. По лесорастительному районированию [23] регион входит в южно-таёжный, хвойно-широколиственных (смешанных) лесов и Двино-Вычегодский районы Европейской части таёжной зоны России.

В современном Национальном стандарте FSC для РФ [9] определены среди типа ВПЦ 3 шесть подтипов, в том числе – редкие лесные экосистемы (ВПЦ 3.4.). Анализ состава сообществ, которые можно отнести к подтипу ВПЦ 3.4. в Кировской области, убедил в необходимости выделения в нём единиц меньшего ранга: класс и уровень. Классы выделяются по преобладающей породе (виду эдификатору), например, Сосновые леса, Елово-пихтовые леса. Уровень – по составу древесного, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, например, в классе Сосновые леса три уровня: лишайниковые, со степным элементом, вересковые.

Основные классы и уровни ВПЦ 3 охарактеризованы по большому числу критериев. Однако выделение и нахождение в природе всех уровней ВПЦ 3 затруднено, поэтому мы выделили признаки, которые позволяют определить наличие перспективных ВПЦ 3 в пределах лесного участка по таксационным описаниям. Это состав древостоя и возраст преобладающей породы. В древостое предлагаем учитывать не только видовой состав, но и количественное присутствие пород по числу единиц в формуле леса. Например, для уровня многопородные леса (в подзонах средней и южной тайги) класса Леса с участием широколиственных пород принят критерий наличия в породном составе не менее трёх единиц трёх любых широколиственных пород: *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L. или видов рода *Ulmus* L.

Характеристика ВПЦ 3 по предложенным критериям выглядит следующим образом. **Класс Пихтово-еловые леса** – сообщества из видов рода *Picea* A. Dietr., *Abies sibirica* Ledeb. с возможным участием в древостое *Betula* L. *A. sibirica* – не менее 4 единиц в формуле леса, возраст преобладающей породы более 120 лет. Это один из доминирующих ранее типов лесов региона, но сохранившийся на небольших площадях, а также – местообитания существовавших ранее (до ледника) видов трав и западных «пришельцев». В связи с составом трав в этом классе выделены два уровня:

1) пихто-ельники крупнопоротниковые с неморальными элементами и высокотравьем; 2) пихто-ельники с редкими и уязвимыми видами. В сообществах первого уровня могут быть виды рода *Dryopteris* Adans., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth, неморальные травы (*Lathyrus vernus* (L.) Bernh., *Melica nutans* L., *Milium effusum* L., *Paris quadrifolia* L., *Pulmonaria obscura* Dumort, *Stellaria holostea* L. и др.) и/или виды бореального высокотравья (*Aconitum excelsum* Reichenb., *Atragene sibirica* L., *Cacalia hastata* L., *Cicerbita uralensis* (Rouy) Beauverd, *Delphinium elatum* L., *Diplasium sibiricum* (Turcz. ex G. Kunze) Kurata, *Ligularia sibirica* (L.) Cass, *L. martagon*, *Paeonia anomala* L., *Pleurospermum uralense* Hoffm., *Veratrum lobelianum* Bernh., виды *Actaea* L. и др.).

В сообществах второго уровня рассеянно или микрогруппировками встречаются виды рода *Dactylorhiza* Neck. ex Nevskl, *Cypripedium calceolus* L., *Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Calypso bulbosa* (L.) Oakes, *Epipogium aphyllum* Sw. и др.

Эти лесные участки полнотой не более 0,6. Для сохранения биоразнообразия здесь при лесозаготовках возможны лишь санитарные рубки.

Класс Сосновые леса включает три уровня ВПЦ 3. Сосняки сфагновые с редкими и уязвимыми видами, где в древостое наряду с основной лесобразующей породой возрастом более 140 лет встречается *Betula*. Эти старые неэксплуатируемые леса, места обитания представителей семейства Orchidaceae – виды рода *Dactylorhiza*, *Epipactis palustris* (L.) Crantz, *S. hirculus* и беспозвоночных животных. Здесь возможны лишь санитарные рубки.

Сосняки лишайниковые (со степными элементами) с *P. sylvestris* более 80 лет. Это одно из исторически старых типов сообществ, настоящие и потенциальные местообитания степных и лугово-степных видов трав: *Astragalus arenarius* L., *C. sumensis*, *D. arenarius*, *D. borbasii*, *D. ruyschiana*, *G. paniculata*, *Festuca polesica* Zapal., *Jurinea cyanoides* (L.) Reichenb., *Koeleria glauca* (Spreng.) DC. s. l., *Potentilla humifusa* Willd. ex Schlecht., рода *Pulsatilla* Mill. и др. У многих в регионе расположена северная граница ареала. Здесь целесообразно проведение выборочных рубок с доведением полноты до 0,4–0,5 для поддержания существования *P. sylvestris*, редких и уязвимых видов трав.

Сосняки вересковые возрастом более 80 лет – также одно из исторически старых сообществ в Кировской области с видами на восточной

границе ареала, как *Calluna vulgaris*. Здесь допустимы лишь выборочные рубки.

ВПЦ 3 класса **Лиственничные леса** в регионе немногочисленны. У *Larix sibirica* Ledeb. здесь проходит западная граница ареала. В древостое должно быть не менее 4 единиц этого вида, возраст особей – более 160 лет. Для обеспечения семенного воспроизведения целесообразны выборочные рубки.

ВПЦ 3 класса **Леса с участием широколиственных пород** представлены сообществами из *Q. robur*, *T. cordata*, *Ulmus* и *Acer*. Это исторически старые типы сообществ на северной границе их распространения с редкими и охраняемыми видами: *Digitalis grandiflora* Mill., *L. martagon*, *T. aquilegifolium*, *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm. и *Neckera pennata* Hedw. В этом классе выделено три уровня ВПЦ 3: липовые, многопородные и дубовые леса. Липовые леса (в подзонах средней и южной тайги) с *T. cordata* возрастом более 70 лет, не менее 4 единиц в формуле. Многопородные широколиственные леса (в подзонах средней и южной тайги) из *Q. robur*, *T. cordata*, *Ulmus* и *Acer*, в древостое которых встречаются не менее трёх пород из них, составляющих в совокупности не менее трёх единиц в формуле. Дубовые леса (по всей области) с *Q. robur* возрастом более 80 лет, не менее 4 единиц в формуле древостоя и возможной примесью других пород. Для сохранения этих сообществ также необходимы лесохозяйственные мероприятия. Пока, до проведения детальных исследований, рекомендуем в них только выборочные рубки с сохранением особей видов широколиственных пород вне технологической сети.

В классе **Старовозрастные осинники** уровни не выделяются. В древостое с присутствием не менее 5 единиц *Populus tremula* L. возрастом более 80 лет, возможны виды ели. Основанием для придания статуса ВПЦ 3 этим сообществам является обязательное наличие в них *L. pulmonaria*, занесённой в Красные книги РФ [20] и многих регионов, в том числе Кировской области [21], и комплекса сопутствующих ей видов. Сохранение таких осинников затруднено без ведения в них хозяйственной деятельности: здесь либо произойдёт смена пород, и лес станет еловым, либо старые особи *P. tremula* выпадут, что грозит захламливанием территории и повышением пожарной опасности. Поэтому для сохранения осинника с *L. pulmonaria*, обеспечения восстановления типичного зонального типа леса – елового – предлагается проведение выборочных рубок в них с сохранением раз-

новозрастных куртин *P. tremula* размером не менее 30 × 30 м.

Также к однотипным относится **класс Чёрноольховые леса**, который представлен сообществами из *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. возрастом более 60 лет с присутствием её в древостое не менее 5 единиц. Это редкие, малочисленные, уязвимые типы фитоценозов; кроме того, они обеспечивают регуляцию гидрологического режима территории. Любую хозяйственную деятельность в них рекомендуется запретить.

Предлагаемые сообщества по территории региона представлены неравномерно. В подзонах средней и южной тайги произрастают пихтово-еловые и лиственничные леса, липовые леса и леса с наличием трёх и более широколиственных древесных пород. В подзонах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов – чёрноольховые леса. По всей области встречаются сосновые и дубовые леса, а также старовозрастные осинники.

Мы сопоставили выделенные ранее РЛЭ [10] и предложенные ВПЦ 3. Установлено: 1) основные лесные РЛЭ соответствуют разным категориям выделенных ВПЦ 3; 2) ряд РЛЭ не являются лесными; 3) отдельные РЛЭ отнесены к ключевым биотопам и включены в Лесные регламенты Кировской области; 4) по отдельным РЛЭ нет данных. Таким образом, вместо 13 РЛЭ предлагаем для Кировской области шесть классов и 11 уровней ВПЦ 3.

Заключение

Предложенная система ВПЦ 3 Кировской области имеет следующий вид.

Класс 3.1. Пихтово-еловые леса

Уровень 3.1.1. Крупнопоротниковые с неморальными элементами и высокотравьем

Уровень 3.1.2. С редкими и уязвимыми видами

Класс 3.2. Сосновые леса

Уровень 3.2.1. Сфагновые с редкими и уязвимыми видами

Уровень 3.2.2. Лишайниковые (со степными элементами)

Уровень 3.2.3. Вересковые

Класс 3.3. Лиственничные леса

Класс 3.4. Леса с участием широколиственных пород

Уровень 3.4.1. Липовые леса (в подзонах средней и южной тайги)

Уровень 3.4.2. Многопородные леса (подзоны средней и южной тайги)

Уровень 3.4.2. Дубовые леса (включая подзону смешанных лесов)

Класс 3.5. Старовозрастные осинники

Класс 3.6. Чёрноольховые леса

При этом значимость сообщества для сохранения биоразнообразия не меняется в зависимости от его места в системе ВПЦ 3 региона; леса в статусе уровней могут быть более репрезентативными и ценными с этих позиций. Разработанная система не является окончательной, может быть дополнена и расширена в связи с вновь появляющимися данными.

References

1. Whitaker R.H. Communities and ecosystems. New York: Macmillan, 1975. 385 p.
2. Convention on Biological Diversity. United Nations Environment Programme. Nairobi: United Nations, 1992. 79 p.
3. Global biodiversity: Status of Earth's Living Resources. Compiled by World Conservation Monitoring Centre in collaboration with The Natural History Museum, London, and in association with IUCN, UNEP, WWF, WRI. London: Chapman & Hall, 1992. 585 p.
4. Glowka L., Burhenne-Guilmin F., Synge H., McNeely J.A., Gundling L. A Guide to the Convention on Biological Diversity. IUCN, Gland and Cambridge. 1994. 161 p.
5. Global Biodiversity Assessment / UNEP, V.H. Heywood (Executive Editor), R.T. Watson (Chair) and 1500 experts. Cambridge University Press, Cambridge, 1995. 1140 p.
6. National standard of the Russian Federation. Forest management and forest management. Certification requirements. GOST R 58003-2017 (date of introduction 2018-06-01). Moskva, 2018. 28 p. (in Russian).
7. Dvornikov M.G., Shiryaev V.V., Safonov V.G., Strelnikov D.P. Monitoring of natural and natural-anthropogenic objects in the province of Vyatka-Kama Upland // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 91–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-091-096
8. Gaychuk M.V., Mayorova L.P. Forest certification in system of energy and resources saving of logging company // Elektronnoe nauchnoe izdanie "Uchenye zametki TOGU". 2014. V. 5. No. 1. P. 19–35 (in Russian).
9. National standard FSC of the Russian Federation (FSC-STD-RUS-02-2020 RU), date of introduction 2020-08-10. Moskva, 2020. 187 p. (in Russian).
10. Russian national standard for voluntary forest certification under the FSC scheme. FSC-STD-RUS-V6-1-2012 Russian Natural and Plantation EN. Moskva, 2012. 198 p. (in Russian).
11. Krestov P.V., Verkholat V.P. Rare plant communities of Amur region. Vladivostok: DVO RAN, 2003. 200 p. (in Russian).
12. Survey of biologically valuable forests in North-Western European Russia. V. 1. Method of survey and mapping / Eds. L. Andersson, N.M. Alexeeva, E.S. Kuznetsova.

Sankt-Peterburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2009. 238 p. (in Russian).

13. Ray E.A., Dobrynin D.A., Toorkhov S.V., Yanitskaya T.O., Fedorov S.E., Edovin A.G., Shchegolev A.A., Kulyasov I.P., Kulyasova A.A. Isolation and conservation of high conservation value forests in the Arkhangelsk region: methodological manual. Arkhangelsk: WWF, 2010. 68 p. (in Russian).

14. Slashev D.N., Sannikov P.Yu. High conservation value forests of north-western part of Perm region // *Geograficheskiy vestnik*. 2011. No. 2. P. 66–72 (in Russian).

15. Efremov D.F., Baburin A.A., Vasilev E.S., Ponomarenko S.Ya., Shonin A.A. Methodical manual on allocation of regional system of high conservation value forests (for example the Far East). Khabarovsk: KGUP Khabarovskaya kraevaya tipografiya, 2012. 116 p. (in Russian).

16. Zolotov D.V., Kuzmenkin D.V., Chernykh D.V., Solomakhin D.N., Gribkov A.V. Recommendations for the allocation of high environmental values of the category “Rare ecosystems and habitat” in the forests of the Altai territory. Krasnoyarsk: WWF, 2019. 66 p. (in Russian).

17. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Kiseleva T.M. Condition and restoration of pine woods SPNT “Medvedsky pine forest” // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. V. 14. No. 15. P. 1359–1362 (in Russian).

18. Savinykh N.P., Perestoronina O.N., Shabalkina S.V. The state and dynamics of biodiversity in the artificial regeneration of pine forests // *Vestnik TvGU. Seriya “Biologiya i ekologiya”*. 2018. No. 3. P. 301–316 (in Russian). doi: 10.26456/vtbio19

19. Klirosova V.P. Vegetation // *Nature of Kirov region. Kirov: Kirovskoe otdelenie Volgo-Vyatskogo knizhnogo izd-va*, 1967. P. 180–218 (in Russian).

20. Red book of the Russian Federation (plants and fungi). Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 855 p. (in Russian).

21. Red book of the Kirov region: animals, plants, fungi. Kirov: OOO Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2014. 336 p. (in Russian).

22. Geobotanical zoning of the non-Chernozem region of the European part of the RSFSR. Leningrad: Nauka, 1989. 64 p. (in Russian).

23. On amendments to order of the Ministry of natural resources and ecology of Russia from 18.08.2014 No. 367 “On approval of list of forest zones of the Russian Federation and the list of forest areas of the Russian Federation” (Prikaz ot 23 dekabrya 2014. No. 569) (in Russian).

Элиминация фекальных индикаторных бактерий в почвах при многократном поливе животноводческими стоками

© 2021. О. Е. Чезлова¹, н. с., А. А. Волчек², д. г. н., профессор, декан,

¹Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, 224020, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Советских пограничников, д. 41,

²Брестский государственный технический университет, 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, д. 267, e-mail: olgachezlova@tut.by, Wolchak@tut.by

Оценена динамика отмирания *Escherichia coli*, бактерий группы кишечной палочки (БГКП) и энтерококков в сельскохозяйственных почвах при поливе сточными водами свиного комплекса нормами 90, 180 и 270 м³/га трижды в течение вегетационного периода. К концу периода по показателям БГКП и энтерококков гигиенический норматив превышен на 2 порядка при нормах 180 и 270 м³/га. Для описания динамики численности микроорганизмов использована аппроксимация первого порядка. Определены время 90%-ной элиминации и константы скорости отмирания бактерий. Для первого полива стоками регрессионные зависимости имели преимущественно высокий коэффициент детерминации от 0,7 до 0,9. Наибольшая скорость отмирания отмечалась у *E. coli*: константа отмирания k находилась в диапазоне от 0,129 до 0,253 день⁻¹ и время 10-кратного сокращения численности от 17,9 до 10,4 дней при нормах полива 90 и 180 м³/га соответственно. Для энтерококков параметр k варьировал от 0,092 до 0,149 день⁻¹, а время 90%-ной элиминации от 25,1 до 15,4 дней при нормах полива 90 и 270 м³/га соответственно. Для БГКП при поливе нормой 90 м³/га $k = 0,131$ день⁻¹, а время 90%-ной элиминации 17,6 дня. К третьему поливу стоками скорость элиминации *E. coli*, энтерококков и БГКП снижалась – константа k уменьшалась в среднем в 4,45; 3,79 и 2,12 раза соответственно. Для адекватного описания динамики фекальных индикаторных бактерий в почвах земледельческих полей орошения необходимо учитывать климатические, почвенные факторы, объём внесения стоков и др.

Ключевые слова: санитарно-показательные бактерии, полив сточными водами, модели.

Elimination of fecal indicator bacteria in soils at repeated irrigation with livestock waste

© 2021. O. E. Chezlova¹ ORCID:0000-0003-2314-3605, A. A. Volchak² ORCID: 0000-0002-8838-797X^{*}

¹The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus, 41, Sovetskikh pogranichnikov St., Brest, Belarus, 224020,

²Brest State Technical University, 267, Moskovskaya St., Brest, Belarus, 224017, e-mail: olgachezlova@tut.by, Wolchak@tut.by

To determine the survival time of fecal indicator bacteria (coliform bacteria, *Escherichia coli* and enterococci) in soils, a field experiment was conducted on sod-podzolic gley soil on cohesive sand when disposing of wastewater from livestock farms. During the field season, wastewater was introduced three times by the norms of 90, 180 and 270 m³/ha. By the end of the vegetation period, the content of coliform bacteria in the soil using the norms of 180 and 270 m³/ha is $2.17 \cdot 10^2$ and $2.16 \cdot 10^2$ CFU/g, respectively; the number of enterococci is $3.94 \cdot 10^2$ CFU/g and $2.17 \cdot 10^2$ CFU/g, respectively. To describe the dynamics of the number of microorganisms, a first order approximation was used. During the first irrigation with wastewater, the highest withering rate was observed in *E. coli*: the extinction constant k was in the range 0.129 to 0.253 day⁻¹, and the time of a 10-fold reduction in numbers was from 17.9 to 10.4 days with irrigation rates of 90 and 180 m³/ha, respectively. For enterococci, the parameter k ranged from 0.092 to 0.149 day⁻¹, and the time of 90% elimination ranged from 25.1 to 15.4 days with irrigation rates of 90 and 270 m³/ha, respectively. For coliform bacteria with a watering rate of 90 m³/ha, $k = 0.131$ day⁻¹, and the time of 90% elimination is 17.6 days. By the third irrigation with wastewater, the rate of elimination of *E. coli*, enterococci and coliform bacteria decreased – the constant k decreased by an average of 4.45, 3.79 and 2.12 times, respectively. For an adequate description of the dynamics of indicator bacteria in soils, it is necessary to take into account climatic, soil factors, the amount of wastewater, etc.

Keywords: sanitary-indicative bacteria, sewage irrigation, models.

Полив сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО) сточными водами (СВ) животноводческих комплексов, что является преимущественным способом утилизации данных отходов в Беларуси, зачастую приводит к длительному загрязнению почв и поверхностных вод фекальными бактериями, потенциально способными вызывать заболевания у людей [1]. В зависимости от климатических, гидрогеологических и агротехнических факторов стоки могут быть внесены в почву однократно или многократно в течение вегетационного периода. Для нормирования антропогенной нагрузки необходимо определить сроки выживания патогенной микробиоты в почвах сельхозугодий, что затруднительно в связи с небольшим её количеством во внешней среде, неравномерностью распределения, отмиранием [2]. Как показали исследования, *Escherichia coli* и энтерококки являются индикаторными микроорганизмами (МО), имеющими наибольшую степень ассоциации со вспышками заболеваний желудочно-кишечного тракта [3]. Также традиционно исследуется количество бактерий группы кишечной палочки (БГКП).

В природных экосистемах происходит постепенное отмирание фекальных (патогенных и условно-патогенных) МО, адаптированных к жизни в организмах животных и человека. Тем не менее многие бактерии, оказавшись в природных экосистемах, становятся их постоянными обитателями [4].

В почве наблюдается рост количества бактерий в 1,5–2 раза сразу после внесения животноводческих СВ. Общее количество бактерий таких почв может превышать 10^6 , а содержание БГКП – 10^3 КОЕ/г. Показано, что *E. coli*, *Salmonella* sp., *Campylobacter* spp., *Enterococcus* spp. могут выживать в орошённых СВ почвах более одного года [5, 6]. Большая вариабельность выживаемости *E. coli* наблюдается при удобрении почвы навозом – от нескольких суток до нескольких месяцев [7–9]. Отмечено, что в сухой супесчаной почве количество *E. coli* достигало значения менее 10 КОЕ/г через 100 дней, а в глинистой почве – через 200 дней [10].

В практических целях при описании отмирания патогенных и индикаторных бактерий обычно используется уравнение аппроксимации первого порядка [11, 12]:

$$N_t = N_0 \cdot \exp(-kt), \quad (1)$$

где N_t – количество бактерий в момент времени t , КОЕ/г; N_0 – количество бактерий

в начальный момент времени, КОЕ/г; k – константа отмирания первого порядка (день⁻¹); t – прошедшее время (день).

Однако большинство исследований отмирания бактерий были проведены в лабораторных экспериментах, что затрудняет применение полученных результатов для естественных условий [3].

Целью данной работы явилась оценка отмирания колиформных бактерий, *E. coli* и энтерококков в сельскохозяйственных почвах при внесении в неё стоков свиноводческого селекционно-гибридного центра (СЦГ) «Западный» трижды в течение вегетационного периода тремя поливными нормами.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись СВ и почвы сельхозугодий СЦГ «Западный», а также МО стоков и почв. На СЦГ «Западный» ежедневно образуется около 1000 м³ СВ. Сточные воды содержат: общих колиформных бактерий – $2,19 \cdot 10^4$, термотолерантных колиформных бактерий – $8,45 \cdot 10^2$, энтерококков – $2,8 \cdot 10^4$ КОЕ/100 мл. Численность представителей сем. Enterobacteriaceae в титрах: *E. coli* – 0,01–0,001; *Citrobacter freundii* – 0,1; *Proteus vulgaris* – 0,01; *Providencia alcalifaciens* – 0,1; *Pantoea agglomerans* – 0,1–1 [13].

Для определения динамики отмирания фекальных бактерий в почвах ЗПО в вегетационный период 2016 г. проведён мелкоделяночный полевой опыт на участке пастбища, не удобрявшимся более 3 лет. В эксперименте использовано 3 поливные нормы СВ: 90, 180 и 270 м³/га. В данной работе отражены результаты 2-го года исследований. Годом ранее стоки вносились однократно по той же схеме. Почва исследуемого участка дерново-подзолистая глееватая на связном песке. Площадь делянки 1 м². Повторность трёхкратная. Сообщество многолетних трав включало овсяницу тростниковую, ежу сборную, клевер луговой. За вегетационный сезон было произведено 3 полива СВ указанными выше нормами (апрель, май, июль). Пробы для микробиологического анализа, отобранные стерильным инструментом в стерильные полиэтиленовые пакеты по ГОСТ 17.4.4.02-84, доставляли в течение 2 ч в лабораторию и до начала исследования хранили в холодильнике (не более суток). В работе использовали стандартные методики бактериологического анализа [14]. Из отобранных почв с соблюдением условий стерильности готовили серии десятичных

разведений для посева на селективные и не селективные питательные среды в соответствии с показателем. Расчёт количества МО производился на 1 г абсолютно сухой почвы.

Для определения БГКП почвенные суспензии сеяли на среды лактозо-пептонную и Эндо. Затем следовала инкубация посевов в термостате в течение 18–24 ч при температуре 37 ± 1 °С. При обнаружении грамотрицательных оксидазоотрицательных палочек производили посев в полужидкую среду с лактозой. Дополнительно оценивали термотолерантные свойства МО по признаку ферментации лактозы при температуре 44 ± 1 °С. Дифференциацию *E. coli* проводили по комплексу биохимических признаков [14, 15].

Для определения энтерококков использовали прямой посев почвенных суспензий на среду энтерококкагар. Засеянные чашки инкубировали при температуре 37 ± 1 °С в течение 44–48 ч. Для подтверждения роста энтерококков делали каталазный тест и микроскопию окрашенных по Граму мазков.

Данные результатов эксперимента обрабатывали с помощью стандартных методик [16].

Результаты и обсуждение

В результате трёх поливов животноводческими стоками в течение вегетационного

периода наблюдались изменения динамики численности микробиоты почв ЗПО (рис. 1–3).

Наибольшее количество БГКП обнаружено после третьего полива СВ при максимальной в опыте норме СВ $270 \text{ м}^3/\text{га} - 1,36 \cdot 10^3 \text{ КОЕ}/\text{г}$. К концу вегетационного периода содержание БГКП остаётся повышенным при использовании норм 180 и $270 \text{ м}^3/\text{га}$ – соответственно $2,17 \cdot 10^2$ и $2,16 \cdot 10^2 \text{ КОЕ}/\text{г}$, что на 2 порядка превышает гигиенический норматив для «чистой» почвы ($1-9 \text{ КОЕ}/\text{г}$). Разница с контролем оказалась статистически значимой (при уровне значимости $p = 0,05$) при нормах 180 и $270 \text{ м}^3/\text{га}$ и не значимой при $90 \text{ м}^3/\text{га}$.

Содержание термотолерантной *E. coli* в поливных СВ было значительным – до титра 0,01 мл. Её численность возрастала в почвах поливаемых участков. Однако если после первого полива СВ кишечная палочка обнаруживается только через 5 и 14 дней после полива СВ (за исключением варианта полива СВ $270 \text{ м}^3/\text{га}$ – через месяц её количество в почве наблюдалось на уровне $40 \text{ КОЕ}/\text{г}$), то во второй и третий полив *E. coli* встречается во всех вариантах до 2-го месяца после внесения, что связано с высокой активностью ризосферы многолетних трав в начале вегетационного периода [17], более благоприятными погодноклиматическими условиями. Через 2 месяца после 3-го полива СВ нормой $270 \text{ м}^3/\text{га}$ *E. coli*

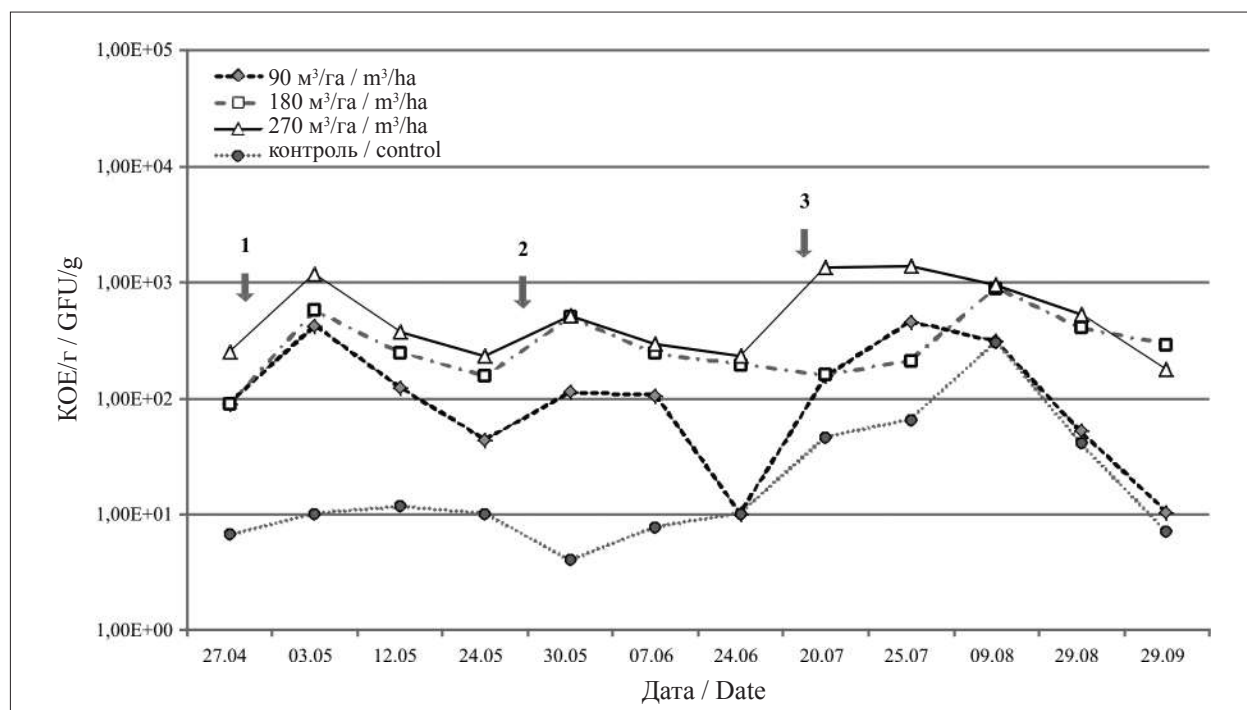


Рис. 1. Динамика колиформных бактерий в почвах полевого участка:
1 – 1-й полив СВ; 2 – 2-й полив СВ; 3 – 3-й полив СВ

Fig. 1. The dynamics of coliform bacteria in the soils of the field site:
1 – 1st watering sewage; 2 – 2nd watering sewage; 3 – 3rd watering sewage

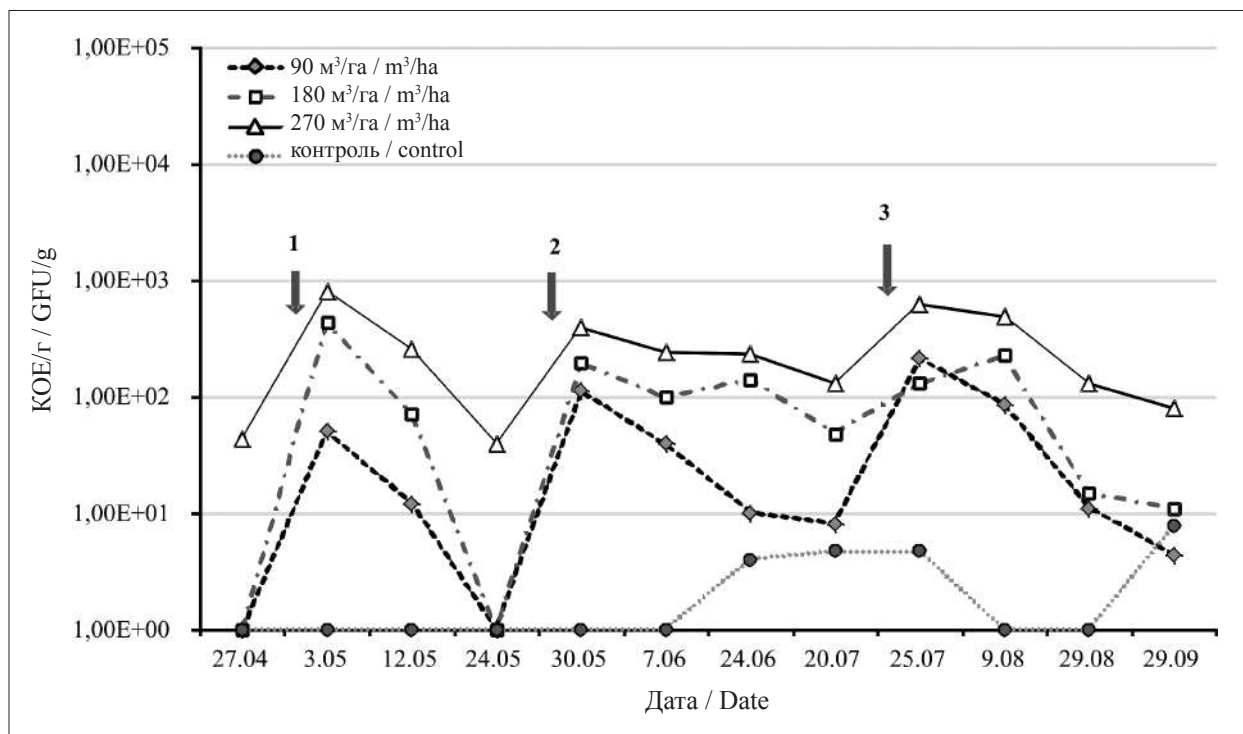


Рис. 2. Динамика *E. coli* в почвах полевого участка.
 Варианты опыта и обозначения такие же, как и на рисунке 1
Fig. 2. The dynamics of *E. coli* in the soils of the field site
 Experiment options and designations are the same as in Figure 1

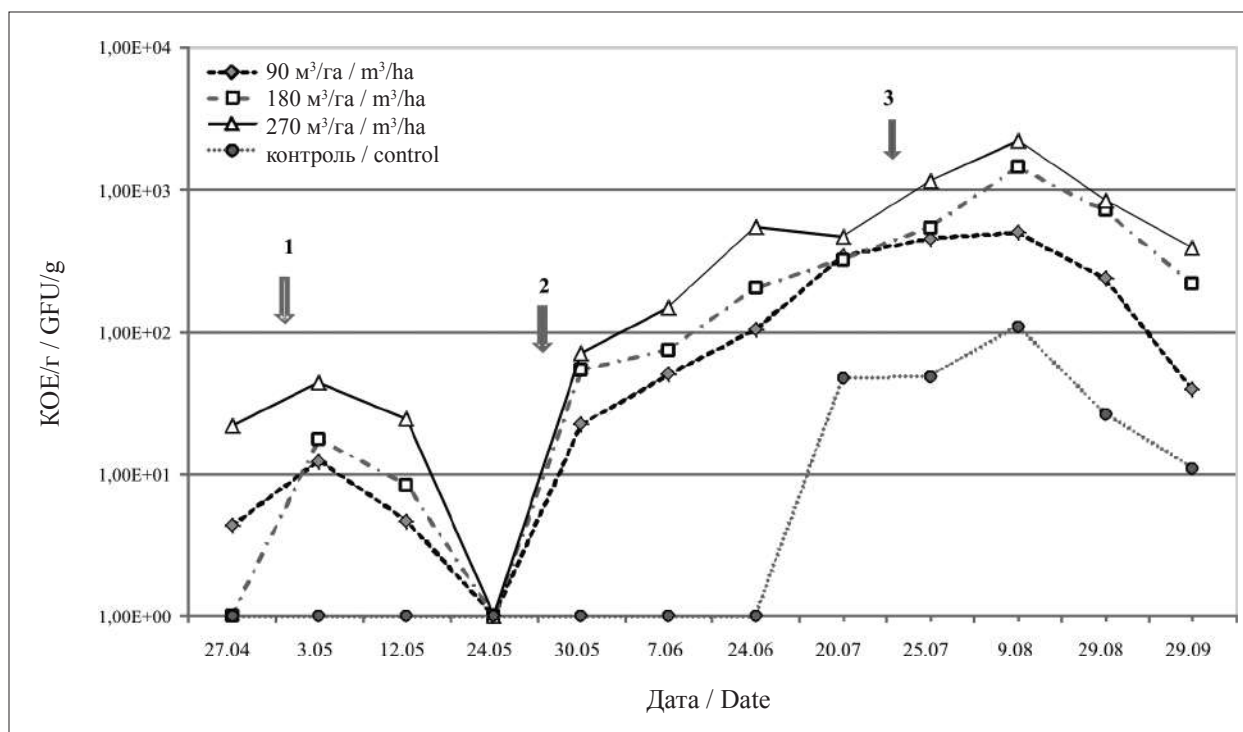


Рис. 3. Динамика энтерококков в почвах полевого участка
 Варианты опыта и обозначения такие же, как и на рисунке 1
Fig. 3. The dynamics of enterococci in the soils of the field site
 Experiment options and designations are the same as in Figure 1

Таблица / Table

Параметры уравнений линейной регрессии от времени, *D*-значения и коэффициенты отмирания БГКП, *E. coli* и энтерококков / The parameters of the linear regression equations from time to time, *D*-values and dying factors of coliform bacteria, *E. coli* and enterococci

Номер полива/ норма полива, м ³ /га Watering number/ watering rate, m ³ /ha	N_0 , КОЕ/г N_0 , CFU/g	Коэффициент отмирания <i>k</i> , день ⁻¹ Death rate <i>k</i> , day ⁻¹	R^2	<i>F</i> -критерий <i>F</i> -value	Критическое значение <i>F</i> -критерия* Critical <i>F</i> -value*	<i>D</i> -значения, дни <i>D</i> -values, days
БГКП / Coliform bacteria						
1 / 90	878	0,131	0,75	21,53	5,59	17,6
3 / 270	1616	0,034	0,91	97,39	4,96	68,1
3 / 90	531	0,062	0,78	34,70	4,96	37,2
<i>E. coli</i>						
1 / 270	3943	0,222	0,71	17,32	5,59	10,4
1 / 180	1986	0,253	0,93	92,79	5,59	9,1
1 / 90	60	0,129	0,79	13,57	5,59	17,9
2 / 270	446	0,029	0,43	7,61	4,96	79,6
2 / 180	193	0,033	0,35	5,28	4,96	70,4
2 / 90	91	0,049	0,65	18,69	4,96	46,7
3 / 270	832	0,049	0,71	24,08	4,96	46,6
3 / 180	138	0,039	0,48	9,24	4,96	58,4
3 / 90	124	0,053	0,61	15,47	4,96	43,5
Энтерококки / Enterococci						
1 / 270	139	0,149	0,88	50,09	5,59	15,4
1 / 180	35	0,106	0,73	18,80	5,59	21,7
1 / 90	21	0,092	0,65	13,14	5,59	25,1
3 / 270	1876	0,025	0,49	9,46	4,96	92,1
3 / 90	870	0,057	0,66	19,60	4,96	40,2

Примечание: * – на уровне значимости $p = 0,05$.
Note: * – at the significance level $p = 0.05$.

обнаруживалась в количестве 80 КОЕ/г при существенной разнице с контролем. В почвах контрольных делянок количество данного фекального индикатора не превышало 10 КОЕ/г.

В изменении численности энтерококков наблюдалась следующая закономерность: после подъёма численности в результате 1-го полива СВ наблюдался экспоненциальный спад, а второй и третий поливы СВ приводили к росту показателя. Так, через месяц после 2-го полива число энтерококков увеличивалось на порядок – при нормах 180 и 270 м³/га соответственно до $2,0 \cdot 10^2$ и $5,5 \cdot 10^2$ КОЕ/г. После 3-го полива СВ их численность значительно возрастала (до $1,44 \cdot 10^3$ и $2,21 \cdot 10^3$ КОЕ/г при поливах соответственно 180 и 270 м³/га). Наблюдалась недостаточная очистка почв от данных МО к концу вегетационного периода: при нормах полива 270, 180 и 90 м³/га их содержалось, соответственно, $3,94 \cdot 10^2$; $2,17 \cdot 10^2$; 39 КОЕ/г. Почва контрольных участков содержала энтерококки на уровне 10 КОЕ/г. Разница с контролем оказалась статистически значимой (при уровне значимости $p = 0,05$)

при нормах 180 и 270 м³/га и не значимой при 90 м³/га.

Отмирание индикаторных бактерий было описано как функция линейной регрессии от времени. Для этого концентрации МО трансформированы в виде натуральных логарифмов. На основе полученных уравнений оценены константы скорости отмирания и время 10-кратного сокращения численности МО (так называемое *D*-значение). *D*-значение или «время десятичного сокращения» – это время, необходимое для достижения гибели 90% (или 1 lg) бактерий при данном наборе условий [3, 18].

В таблице представлены уравнения регрессии, имеющие значимые параметры, и расчёты на их основе. Константы скорости отмирания МО, полученные как функция времени линейной регрессии, можно использовать в уравнении 1 для прогнозирования количества бактерий в почвах ЗПО.

В большей мере экспоненциальным падением численности исследуемых бактерий сопровождался первый полив СВ в конце

апреля, причём полученные регрессионные зависимости имели преимущественно высокий коэффициент детерминации от 0,7 до 0,9, что свидетельствует о высоком качестве модели. Наибольшая скорость отмирания отмечалась для *E. coli*: константа отмирания k находилась в диапазоне от 0,129 (полив СВ 90 м³/га) до 0,253 день⁻¹ (полив СВ 180 м³/га). В исследовании в лабораторных условиях инокуляция *E. coli* в двух типах почв сопровождалась более низкими константами отмирания от 0,09 до 0,17 день⁻¹ [19]. В сравнении с другими исследуемыми показателями данная бактерия имела наименьшее время 90%-ной элиминации: от 9,1 до 17,9 дня. Можно отметить, что при первом поливе СВ наибольшая скорость отмирания МО наблюдалась при более высокой норме поливных СВ, что связано с нарастанием конкурентных взаимоотношений МО при увеличении нормы стоков. Так, D -значение для *E. coli* при норме полива СВ 270 м³/га – 10,4 дня, а при норме 90 м³/га – 17,9 дней; для энтерококков при норме 270 м³/га – 15,4, а при норме 90 м³/га – 25,1 дня.

Второй полив СВ в конце мая зачастую сопровождался увеличением численности в почве бактерий (энтерококки, БГКП), что не соответствовало принятой модели. Только для *E. coli* были получены уравнения отмирания бактерий 1-го порядка и то с невысокой и средней степенью аппроксимации (коэффициент детерминации $R^2 = 0,35–0,65$). Скорость отмирания данного вида МО значительно снизилась в сравнении с первым поливом: константа отмирания k находилась в диапазоне от 0,029 до 0,049 день⁻¹, время 10-кратного сокращения численности увеличилось до 46,7–79,6 дней. Полученный результат свидетельствует о снижении способности почвы к самоочищению в данный период, а также о более благоприятных погодных-климатических условиях для депонирования нежелательной микробиоты, что необходимо учитывать при построении моделей.

В результате третьего полива стоками в июле после первоначального подъёма численности бактерий наблюдалось постепенное её снижение для всех исследуемых фекальных индикаторов, что связано, по всей видимости, с ухудшением температурного режима. Однако в сравнении с первым поливом СВ скорость элиминации бактерий снизилась для всех исследуемых показателей. Так, константа k при поливах СВ 90 и 270 м³/га для *E. coli* снизилась от 2,43 до 4,49 раза соответственно

(в среднем в 4,45 раза); для энтерококков от 1,6 до 5,97 раза соответственно (в среднем в 3,79 раза); для БГКП – в 2,12 раза (при поливе СВ 90 м³/га). Соответственно увеличилось и D -значение – для *E. coli* при поливах СВ 90 и 270 м³/га оно увеличилось до 43,5 и 46,6 дней соответственно; для энтерококков – до 40,2 и 92,1 дней соответственно; для БГКП – до 37,2 дней (при поливе СВ 90 м³/га).

Выводы

1. К концу вегетационного периода в почвах ЗПО в результате трёхкратного внесения сточных вод с нормами полива 180 и 270 м³/га наблюдается стойкое бактериальное загрязнение по показателям БГКП и энтерококков (гигиенический норматив превышен на 2 порядка).

2. Многократные поливы СВ в течение одного вегетационного периода приводят к нарастанию кондуктивных свойств почвы, снижению её способности к самоочищению: от первого к третьему поливу сточными водами скорость элиминации *E. coli*, энтерококков и БГКП уменьшается в среднем в 4,45; 3,79 и 2,12 раза соответственно.

3. Для адекватного описания динамики отмирания фекальных бактерий в почвах сельскохозяйственных полей орошения необходимо учитывать погодные-климатические, физические и химические свойства почвы, объём внесения стоков и др.

References

1. Tivo P.Ph., Anzhenkov A.S., Saskevich L.A., But E.A. Analysis of modern technologies to use livestock waste // Melioratsiya. 2017. No. 3. P. 54–63 (in Russian).
2. Bradford S.A., Morales V.L., Zhang W., Harvey R.W., Packman A.I., Mohanram A., Welty C. Transport and fate of microbial pathogens in agricultural settings // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2013. No. 43. P. 775–893. doi: 10.1080/10643389.2012.710449
3. Soupir M.L., Mostaghimi S.J. Lou die-off of *E. coli* and enterococci in dairy cowpats // Transactions of the ASABE. 2008. V. 51. No. 6. P. 1987–1996.
4. Glinushkin A.P., Sokolov M.S., Toporova E.Yu. Phytosanitary and hygienic requirements for healthy soil. Moskva: Izdatelstvo Agrorus, 2016. 288 p. (in Russian).
5. Hutchison M.L., Walters L.D., Moore T., Thomas D.J., Avery S.M. Fate of pathogens present in livestock wastes spread onto fescue plots // Appl. Environ. Microbiol. 2005. V. 71. No. 2. P. 691–696. doi: 10.1128/AEM.71.2.691-696.2005

6. Purdy C.W., Straus D.C., Harp J.A., Mock R. Microbial pathogen survival study in a High Plains Feedyard Playa // Texas J. Sci. 2001. V. 53. No. 3. P. 247–266.
7. Duffy G. Verocytotoxicigenic *Escherichia coli* in animal faeces, manures and Slurries // J. Appl. Microbiol. 2003. V. 94. No. s1. P. 94–103. doi: 10.1046/j.1365-2672.94.s1.11.x
8. Semenov A.V., Franz E., Van Overbeek L., Termorshuizen A.J., Van Bruggen A.H. Estimating the stability of *Escherichia coli* O157: H7 survival in manure-amended soils with different management histories // Environmental microbiology. 2008. V. 10. No. 6. P. 1450–1459. doi: 10.1111/j.1462-2920.2007.01558.x
9. Wang H., Ibekwe A.M., Ma J., Wu L., Lou J., Wu Z., Liu R., Xu J., Yates S.R. A glimpse of *Escherichia coli* O157:H7 survival in soils from eastern China // Science of the Total Environment. 2014. V. 476–477. P. 49–56. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.004
10. Lang N.L., Bellett-Travers M.D., Smith S.R. Field investigations on the survival of *Escherichia coli* and presence of other enteric microorganisms in biosolids-amended agricultural soil // J. Appl. Microbiol. 2007. V. 103. No. 5. P. 1868–1882. doi: 10.1111/j.1365-2672.2007.03489.x
11. Crane S.R., Moore J.A. Modeling enteric bacterial die-off: A review // Water Air Soil Poll. 1986. V. 27. No. 3/4. P. 411–439. doi: 10.1007/BF00649422
12. Wang L., Mankin K.R., Marchin G.L. Survival of fecal bacteria in dairy cow manure // Trans. ASAE. 2004. V. 47. No. 4. P. 1239–1246. doi: 10.13031/2013.16574
13. Chezlova O., Volchak A. Community of opportunistic bacteria of Enterobacteriaceae family in livestock sewage // Natural environment of Polesie: features and development prospects: Sbornik nauchnykh trudov. Brest: Alternativa, 2018. P. 106–108 (in Russian).
14. Instruction 4.2.10-12-9-2006. Methods of sanitary and microbiological studies of the soil: Approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor May 29. 2006. No. 67. Minsk, 2006. 32 p. (in Russian).
15. Application Instructions No. 026–0309 Microbiological diagnosis of diseases caused by enterobacteria: Approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Republic of Belarus. Minsk, 2009. 103 p. (in Russian).
16. Valuyev V.Ye., Volchek A.A., Poyta P.S., Shvedovskiy P.V. Statistical methods in environmental management: studies. manual. Brest: BrPI, 1999, 252 p. (in Russian).
17. Shurkhno R.A., Norina O.S., Gibadullina F.S., Tagirov M.Sh. Biological activity of the rhizosphere of perennial legumes // Achievements of science and technology of agriculture. 2007. No. 3. P. 16–20 (in Russian).
18. Mazzola P., Penna T.C., M da S Martins A. Determination of decimal reduction time (D value) of chemical agents used in hospitals for disinfection purposes. BMC infectious diseases, 2003. P. 3–24. doi: 10.1186/1471-2334-3-24
19. Mubiru D.N., Coyne M.S., Grove J.H. Mortality of *Escherichia coli* O157:H7 in two soils with different physical and chemical properties // J. Environ. Qual. 2000. V. 29. No. 6. P. 1821–1825.

**XVI Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»**

27–28 апреля 2021 г. в Вятском государственном университете прошла XVI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения».

Организаторами конференции выступили Вятский государственный университет, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Музей К.Э. Циолковского, авиации и космонавтики, Кировское отделение № 8612 ПАО Сбербанк, АНО «Охрана леса».

27 апреля 2021 г. в Точке кипения ВятГУ началась работа конференции. С приветственным словом на открытии конференции выступили проректор по науке и инновациям ВятГУ Литвинец С.Г., председатель Общественной Палаты Кировской области Шедько Н.И., министр охраны окружающей среды Кировской области Албегова А.В., заместитель начальника отдела санитарного надзора Управления Роспотребнадзора по Кировской области Карачёва О.В., Вице-Президент Союза «Вятская торгово-промышленная палата» Перминов Л.И. Во время приветствия была отмечена важность ежегодно проводимой конференции для экологов, биологов, представителей природоохранных служб и ведомств.

На пленарном заседании с научными докладами выступили профессор, д.б.н. Савиных Н.П. «О выделении редких экосистем и местообитаний для сертификации лесов Кировской области» (ВятГУ, г. Киров), с.н.с., к.б.н. Лаптева Е.М. «Влияние растительности на свойства почв в постагрогенных экосистемах средней тайги (на примере Республики Коми)» (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар), доцент, к.б.н. Даббах Е.В. «Экологические особенности состояния техногенных территорий Кировской области» (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Киров).

В завершении пленарного заседания были подведены итоги регионального конкурса экологических плакатов «Моя чистая страна», который был проведён при поддержке Кировского отделения ПАО Сбербанк. Всего на конкурс поступило 82 работы, которые были размещены на интернет странице конкурса. По итогам интернет голосования и работы конкурсной комиссии было выделено 26 плакатов-победителей в разных номинаци-

ях. Памятные призы и дипломы победителям конкурса вручила Храпова Н.В. помощник Управляющего Кировским отделением № 8612 ПАО Сбербанк.

Работа конференции продолжилась на секционных заседаниях, которые были посвящены экологическим проблемам регионов, химии и экологии почв, экологии микроорганизмов, экологии и биологии растений и животных. Доклады участниками конференции были сделаны как в очном формате, так и онлайн. Всего на секционных заседаниях 27 апреля было сделано 34 доклада. Каждый доклад, представленный на конференции, вызывал большой интерес, было задано много вопросов, в обсуждении представленных материалов принимали участие учёные из разных регионов.

Во второй день конференции состоялось заседание секции «Защита и охрана леса». Участие в организации и работе секции приняли председатель АНО «Охрана леса», депутат Законодательного собрания Кировской области Сыкчина О.В., министр лесного хозяйства Кировской области Лебедев Д.С., руководитель КОГСАУ «Лесоохрана» Сибатулин Р.С., заведующая кафедрой экологии и природопользования ВятГУ Рябова Е.М. В работе секции приняли участие руководители и члены школьных лесничеств из районов Кировской области. На секционном заседании был обсуждён опыт работы школьных лесничеств, планы на будущее, определены направления взаимодействия школьных лесничеств между собой и с другими организациями и ведомствами.

28 апреля работа конференции продолжилась в детском космическом центре имени лётчика-космонавта дважды Героя СССР В.П. Савиных. Известно, что 2021 г объявлен годом науки и техники, а апрель месяц посвящен теме космоса. Поэтому, на конференции был проведён научный семинар «Цифровые и аэрокосмические технологии экологического мониторинга». Работа семинара началась с пленарного доклада доцента, к.б.н. Елсакова В.В. «Спутниковые съёмки в исследовании трендов изменений экосистем Арктики» (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар). На семинаре обсуждались вопросы применения ГИС технологий в мониторинговых исследованиях, перспектив использова-

ния беспилотных летательных аппаратов для изучения растительности, дешифрирования растительности по спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения с применением данных полевых исследований.

После завершения семинара началась работа секции «Экологический мониторинг состояния окружающей среды», традиционно данная секция привлекает большое число участников из разных городов России (Сыктывкар, Москва, Казань, Ростов-на-Дону, Екатеринбург, Уфа, Тюмень, Киров и др.). Доклады, представленные на секции, были посвящены результатам мониторинга лесных фитоценозов в условиях аэротехногенного загрязнения, применению методов биоиндикации и биотестирования в оценке состояния экосистем с разной степенью антропогенной нагрузки, изучению состояния почв и водных объектов с применением физико-химических и биологических методов.

После завершения секционных заседаний для участников конференции была организована экскурсия по детскому космическому

центру, которая вызвала большой интерес у участников конференции, особенно при посещении тематических залов, посвящённых истории космонавтики, биографии космонавтов – земляков, истории планетария.

Всего в конференции приняли участие более 450 человек из 34 городов России и 5 стран (Беларусь, Донецкая Народная Республика, Казахстан, Молдова, Узбекистан).

По итогам мероприятия опубликовано 212 статей в двух сборниках материалов конференции:

Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XVI Всероссийской научно-практической с международным участием конференции. Книга 1 и Книга 2. Киров: ВятГУ, 2021. 445 с. и 400 с.

Сборники материалов и программа конференции размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/sbr.php>

*Ответственный секретарь
конференции, с. н. с., к. б. н.
Огородникова С. Ю.*

Уважаемые коллеги!
Приглашаем принять участие в работе
III Всероссийского научного форума
«Утилизация и рециклинг отходов производства
и потребления»
г. Киров, 23–25 ноября 2021 г.

В рамках форума будут проходить:

1. III Всероссийская научно-практическая конференция «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии»
2. XX Всероссийская конференция с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем»
3. Молодёжный конкурс научно-исследовательских проектов «Разработка методов и технологий обращения с отходами производства и потребления, организации экологического мониторинга»

К началу работы конференции планируется издать сборник материалов конференции.

Организаторы: Вятский государственный университет, ФГУП «ФЭО», Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

Контакты:

<http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>

e-mail: confbioeco@gmail.com

Тел. 8(8332)37–02–77

Ответственный секретарь: С. Ю. Огородникова

ВЫСТАВКА Т.В. КОРШУНОВОЙ «У ГОРОДСКИХ ВОРОТ» – К 15-ЛЕТИЮ ИЗДАТЕЛЬСТВА «О-КРАТКОЕ»

С самого первого номера издателем журнала «Теоретическая и прикладная экология» является издательство «О-Краткое», с которым у редакционной коллегии журнала сложились не только деловые, но и самые тёплые дружеские отношения. В этом году «О-Краткое» отмечает 15-лет со дня основания. Казалось бы, совсем недавно на страницах «ТиПЭ» мы писали о 10-летнем юбилее «О-Краткое» (см. № 2 за 2016 год, 3 стр. обл.), но время летит очень быстро (вы держите в руках 57-й выпуск журнала) – и вот новая знаменательная дата в жизни нашего любимого издательства! Репертуар издательства универсален, выходит далеко за рамки Кировской области, тем не менее предпочтение отдаётся краеведческой и детской литературе, изданиям вятских авторов, книгам по истории и искусству Вятского края. Однако своеобразной визитной карточкой издательства остаётся журнал «Теоретическая и прикладная экология», который готовится к печати и выпускается в свет неизменно в издательстве «О-Краткое» с 2007 года.

К 15-летию «О-Краткое» приурочена выставка главного художника издательства Татьяны Владимировны Коршуновой «У городских ворот», которая торжественно открылась 9 апреля 2021 года в выставочном зале Кировской областной научной библиотеки имени А.И. Герцена. Основу экспозиции составили около пятидесяти акварельных работ последних лет, выполненные автором на пленэрах, также на выставке представлены оформленные художником издания, оригиналы иллюстраций, авторские открытки, рукописные книги. В рамках открытия выставки состоялась презентация каталога работ Т.В. Коршуновой «Акварель», художнику вручена почётная грамота Министерства цифрового развития, информационных технологий и массовых коммуникаций Российской Федерации «за заслуги в развитии связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, многолетний плодотворный труд».

Эта награда неслучайна. Татьяна Коршунова оформила более ста книг, многие из которых становились обладателями наград самых престижных всероссийских и международных конкурсов. Например, книга сказок Т.А. Копаневой «Вятское далёко», оформленная Т.В. Коршуновой, удостоена 12-ти наград различного уровня, включая такие, как национальный конкурс «Книга года», всероссийские

конкурсы «Лучшие книги года» и «Малая родина», международные конкурсы «Искусство книги стран СНГ» и «Золотой витязь», и др. Обложки всех 57-ми номеров журнала «Теоретическая и прикладная экология» оформлены ею. Т.В. Коршунова – член Союза художников России, Союза дизайнеров России и Вятского союза акварелистов, заведующая отделением дизайна Вятского художественного училища.

«О-Краткое» – член Ассоциации книгоиздателей России, участник Российского книжного союза, член Вятской торгово-промышленной палаты и Торгово-промышленной палаты РФ. Каждый год издательство возвращается с книжных конкурсов и выставок-ярмарок не с пустыми руками. В «арсенале» издательства – десятки замечательных книг, не только отмеченных наградами, но и полюбившихся читателям, как на Вятке, так и далеко за её пределами. Это и альбом «Вятка на старинной открытке» (под ред. Е.М. Дрогова, дизайнеры Д.Р. Бельский и А.К. Долгова), и богато иллюстрированное издание «Лошадь в мифах и легендах» (О. Гоувэй, пер. с англ., художник А.В. Мелентьева), и выдержавшие три издания «Вятские народные промыслы и ремёсла», и альбом-каталог «Чудо глиняное, дымковское...», посвящённый знаменитой Дымковской игрушке (оба издания – в оформлении Т.В. Коршуновой, составитель Н.Н. Менчикова), и многие другие. Вот и юбилейный год принёс в копилку издательства несколько заслуженных наград. Победителем всероссийского конкурса краеведческой литературы «Малая родина» в номинации «Дело мастера боится» стала книга В.С. Сизова «Дворянская игрушка» (художник Т.В. Коршунова). А в ежегодном конкурсе «Вятская книга» победителем по итогам 2020 года в номинации «Книга года» стало издание «Защищая Отечество. Милиция Кировской области в Великой Отечественной войне, 1941–45 гг. (под ред. проф. В.Т. Юнгблюда, дизайн А.К. Якушевой).

В дни, когда этот выпуск журнала сдан в печать, издательство «О-Краткое» принимает участие в книжном фестивале «Красная площадь» в Москве (17–20 июня), где традиционно представит Кировскую область. Желаем всем сотрудникам, директору издательства «О-Краткое» Евгению Михайловичу Дрогову новых достижений на ниве отечественно-книгоиздания!

*Редакционная коллегия журнала
«Теоретическая и прикладная экология»*

**ВЫСТАВКА Т.В. КОРШУНОВОЙ
«У ГОРОДСКИХ ВОРОТ» –
К 15-ЛЕТИЮ ИЗДАТЕЛЬСТВА «О-КРАТКОЕ»**



Озеро Неро. 2020. Бумага. Акварель 54x78



Суздаль. Ворота. 2020. Бумага. Акварель 54x78



*Т. Коршунова и Е. Дрогов,
директор издательства «О-Краткое»*



*Т. Коршунова во время записи репортажа
о выставке ГТРК «Вятка»*



Гости и сотрудники библиотеки им. А. И. Герцена на открытии выставки



Индекс 82027, 48482



ISSN 1995-4301



9 771995 430004