



2022

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ Theoretical and
Applied Ecology

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

№ 2



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ**

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

**МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

**СОЦИАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



*Директор Института биологии
Коми НЦ УрО РАН С.В. Дёгтева*

23 марта 2022 г. исполнилось 60 лет со дня образования Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Институт является самым крупным исследовательским учреждением в области оценки ресурсного потенциала экосистем европейского северо-востока России. Структура Института включает 6 крупных отделов, 6 научно-исследовательских лабораторий, научный музей, гербарий (SYKO), виварий и Лесоэкологический стационар. Численность всех сотрудников Института составляет 318 человек, из них научных работников – 163, в том числе 2 члена-корреспондента РАН, 25 докторов и 120 кандидатов наук.

Сотрудниками Института получены уникальные результаты по классическим направлениям биологии и в области экспериментальной биологии. Дана оценка биологического разнообразия, растительности, животного населения, почвенного покрова, состояния и динамики развития экосистем европейского сектора Арктики, Субарктики и бореальной зоны. Высокую оценку экспертов на международном уровне получили работы в области молекулярной радиобиологии и радиэкологии, генетики продолжительности жизни, экологической физиологии растений. Результаты исследований признаны на международном уровне, что подтверждается публикациями в зарубежных монографиях и высокорейтинговых научных журналах, большим количеством международных научных проектов. Хороший потенциал внедрения в производство имеют результаты биотехнологических исследований, которые получили большее количество патентов и наград.

Создание крупнейшей на европейском северо-востоке России гербарной коллекции (SYKO) – важный итог исследований

нескольких поколений ботаников. Научный гербарий включает коллекции сосудистых растений, мохообразных, фиксированных проб водорослей, грибов и лишайников (более 305 тыс. единиц хранения), а также коллекцию живых штаммов цианопрокариот и микроводорослей.

Создана мощная приборная база для проведения современного молекулярно-генетического и физико-химического анализов. Работают два центра коллективного пользования «Молекулярная биология» и «Хроматография». Аккредитованы эко-аналитическая лаборатория и лаборатория миграции радионуклидов и радиохимии. Институт вышел на первые позиции в области количественного химического анализа среди 62 научных учреждений из 28 стран Европы. Получены свидетельства об аттестации 37 методик измерений.

Научным коллективом Института выполнено значительное число крупных проектов, важных для социально-экономического развития региона, разработаны и внедрены технологии оценки состояния экосистем и биологических ресурсов, природовосстановления, которые востребованы промышленными и сельскохозяйственными предприятиями Республики Коми и сопредельных регионов. Институт имеет устойчивые деловые связи с региональным Правительством, крупнейшими компаниями России, интегрирован в международное научное пространство, является участником крупного международного консорциума.

*Директор Института биологии
Коми НЦ УрО РАН, член-корреспондент
РАН, д.б.н., профессор С.В. Дёгтева*

Ректорат Вятского государственного университета, редколлегия журнала «Теоретическая и прикладная экология» поздравляют Светлану Владимировну Дёгтеву с присвоением учёного звания члена-корреспондента РАН, с избранием на должность директора ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, а также весь коллектив Института биологии с 60-летием со дня образования, выражают уверенность, что и впредь Институт будет активно развиваться, растить высококвалифицированные востребованные научные кадры. Желаем быть успешными в проектной деятельности, развивать научное сотрудничество с НИИ и вузами Кировской области и ещё больше укреплять дружбу и научные связи с Вятским государственным университетом.



Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 2, 2022
<http://envjournal.ru>

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 2281 по состоянию на 25.05.2022).

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

Журнал издаётся с 2007 года.

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

Главный редактор Т.Я. Ашихмина, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Вятского государственного университета, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Зам. главного редактора С.В. Дёгтева, д.б.н., член-корр. РАН, профессор, директор ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Зам. главного редактора Л.И. Домрачева, д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного агротехнологического университета

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

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

Ответственный секретарь С.Г. Скугорева, к.б.н., доцент, научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Технические секретари:

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

Адрес редакции:

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

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны. Редакция не несёт ответственности за достоверность информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

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

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

Подписной индекс ПС248 в каталоге «Подписные издания»

официального каталога АО «Почта России».

Зарубежная подписка оформляется через фирмы-партнёры

ЗАО «МК-ПЕРИОДИКА» по адресу: 129110, г. Москва,

ул. Гиляровского, 39, тел.: (495) 281-91-37, 281-97-63.

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

Издательство: ООО «О-Краткое»

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

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

фотографии на 1-й и 4-й обложке – Александр Широких,

администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,

выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 24.06.2022.

Тираж: 250 экз. Заказ № 6802. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография»

Адрес типографии: 610017, Кировская область,

г. Киров, ул. Молодой Гвардии, 57а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., доцент, старший научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Доронников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Л. Коваленко** к.т.н., доцент, доцент Украинского государственного химико-технологического университета
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, профессор, директор Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, профессор Вятского государственного университета
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, зав. отделом и зав. лабораторией Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лаженцев** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, профессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государственного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., старший научный сотрудник, директор Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., доцент, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Б.Н. Хойницки** д.б.н., профессор Познаньского университета наук о жизни (Польша)
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.Т. Юнгблюд** д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 2, 2022

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

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

The journal is published since 2007.

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

Editor-in-Chief T.Ya. Ashikhmina,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary S.G. Skugoreva,

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

Technical Secretaries:

T.I. Kut'yavina, PhD in Biology, Senior Researcher of Vyatka State University,

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

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

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

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

Subscription index PC248 in the joint catalog "Press of Russia".

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.
Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.
Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98
E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe"
Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

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

Release date: June 24, 2022.
Circulation 250 copies. Order No. 6802. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD
Printing Address: 57a 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, Professor, Scientific Director of FRC Komi SC UB RAS
- T.K. Golovko** Doctor in Biology, Professor, Chief Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- V.L. Kovalenko** PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Ukrainian State University of Chemical Technology
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyyets** Doctor in Biology, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State University
- V.P. Meshalkin** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Director of International Institute of Logistics Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Head of Department and Head of Laboratory of Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Doctor in Biology, Foreign Associate of RAS (China), Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- AA. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union
- F. Scapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Assistant Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- B.H. Chojnicki** Doctor in Biology, Professor of Poznan University of Life Sciences (Poland)
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ	<i>Л. И. Домрачева, С. Г. Скугорева, П. А. Стариков, Е. А. Горностаева, Т. Я. Ашихмина</i> Микробы-антагонисты против фитопатогенных бактерий и грибов (обзор) 6
	<i>Л. К. Киш, А. В. Третьяков, О. И. Лаврухина, В. Г. Амелин, М. А. Гергель, Н. В. Мищенко</i> Продукты трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов в пищевой продукции и продовольственном сырье (аналитический обзор) 15
	<i>Н. В. Сырчина, Л. В. Филип, Т. Я. Ашихмина</i> Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) 26

СТАТЬИ

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ	<i>T. I. Kutuyavina, V. V. Rutman, T. Ya. Ashikhmina</i> Using digital maps to identify areas of mass development of phytoplankton in small freshwater reservoirs 35
	<i>N. Das, A. Mondal, S. Mandal</i> Maximum entropy modelling for predicting the potential distribution of methanogens in Sundarban mangrove ecosystem, India 42
МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	<i>Д. Г. Сычева, Н. Е. Кошелева, И. В. Тимофеев</i> Загрязнение почвенного покрова соединениями металлов, мышьяка и сурьмы в районе воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса 48
	<i>О. А. Лоскутова, О. Н. Кононова</i> Зообентос и зоопланктон предгорных озёр Приполярного Урала 56
ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ	<i>Т. А. Пристова</i> Химический состав атмосферных осадков, подкрановых и поверхностных вод в среднетаёжных лиственных насаждениях послерубочного происхождения 63
	<i>А. В. Еликов, П. И. Цапок, Е. М. Карпова, Д. Б. Локтев, В. А. Козволин, Л. Н. Шмакова</i> Влияние высушенных ягод голубики и обогащённых ими продуктов питания на показатели метаболизма при интоксикации тетрахлорметаном 70
ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ	<i>А. И. Фокина, С. Г. Скугорева, Л. В. Трефилова, Л. В. Даровских</i> Определение показателей окислительного стресса в мелиссе лекарственной при действии микромикета <i>Fusarium culmorum</i> и его антагонистов 77
	<i>С. Ю. Огородникова, С. В. Пестов, В. В. Зиновьев, А. П. Софронов</i> Влияние фитопатогенов на содержание пластидных пигментов и интенсивность процессов перекисного окисления липидов в листьях древесных растений 84
ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	<i>А. А. Мальшиев, Н. Н. Солодков, Н. А. Коробкова</i> Формирование модели управления экологизированным производством 93
	<i>Т. С. Уланова, М. В. Волкова, Г. А. Вейхман, А. В. Недошитова</i> К вопросу методического обеспечения определения содержания редкоземельных элементов для производственного контроля 101
ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ	<i>А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова</i> Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей 109
	<i>L. N. Anan'ina, I. A. Kosheleva, E. G. Plotnikova</i> Bacterial consortium as a model for studying the response of the microbial community of the Verkhnekamsk salt mining region to combined pollution 116
РЕМЕДИАЦИЯ И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ	<i>О. С. Филимонова, М. Н. Белицкая, И. Р. Грибуст</i> Особенности распределения <i>Xanthogaleruca luteola</i> (Coleoptera: Chrysomelidae) в защитных насаждениях Нижнего Поволжья 124
	<i>А. П. Каледин, С. В. Бекетов, Д. В. Жуков, В. И. Фертиков, В. М. Макеева, А. В. Смулов, А. М. Остапчук, Е. А. Коноров, Ю. А. Столбовский</i> Микросателлитный анализ популяций уссурийского пятнистого оленя, акклиматизированного в европейской части России 130
	<i>В. В. Степанова, А. В. Аргунов, Д. И. Турский, Р. А. Кириллин, И. М. Охлопков</i> Литофагия <i>Alces alces</i> L. на охраняемых территориях Якутии 138
	<i>И. А. Лиханова, Е. Г. Кузнецова, Е. М. Лантева</i> Нетрадиционный подход к решению проблемы восстановления нарушенных экосистем на Севере 145

РЕМЕДИАЦИЯ И РЕКУЛЬТИВАЦИЯ

Л. П. Рыбашилькова Динамика растительности фитомелиорированного очага дефляции на территории Республики Калмыкия152
А. Н. Беспалов, Н. А. Соколова, Д. А. Соколов Особенности восстановления биогеоценозов при зарастании отвалов угольных разрезов Горловского бассейна159
Е. С. Широкова, Е. В. Товстик, А. В. Сазанов Разложение поли(ε-капролактона) в лабораторных условиях при выдержке на воздухе и в почве165

АГРОЭКОЛОГИЯ

И. Г. Широких, И. В. Лыскова, Я. И. Назарова, Т. П. Градобоева, С. С. Пислегина, Н. А. Боков, Р. И. Абубакирова Местные штаммы стрептомицетов в защите гороха (*Pisum sativum* L.) от вредоносных инфекций ...173
А. Г. Космачева, С. М. Чеснокова, Т. А. Трифонова Исследование влияния антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв183
A. V. Ilinskiy, V. N. Selmen, E. V. Selmen, S. D. Karyakina, M. S. Matyukhin, V. V. Grebennikova The use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the greening of urban areas191

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

J. M. Bambalan, I. K. S. Palapal, R. V. Guleng, E. E. Coracero, R. B. J. Gallego, M. J. A. Suniega Tree diversity and carbon stock in North Poblacion and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines)198
Е. М. Гордеева, И. Е. Ведерникова Лесоклиматические проекты в России: актуальное правовое обеспечение209

СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

А. М. Торцев Хозяйственное использование и сохранение водных биологических ресурсов в России: проблемы правового регулирования216
Л. Ш. Ахмедова, А. А. Гаджиев, Н. О. Гусейнова Системный подход как научная парадигма естественно-научного познания222
A. A. Sozinova, V. A. Bondarenko, M. Smokova, N. G. Rumyantsev Actualization of the “green” image for territorial development228
С. В. Ермолаева, Е. О. Иванов Анализ цитогенетического статуса детей и подростков, проживающих на территориях с разной экологической обстановкой234

ИНФОРМАЦИЯ

К юбилею Л. И. Домрачевой241
Т. Я. Ашихмина Журнал «Теоретическая и прикладная экология» совершенствуется и развивается242
Т. Я. Ашихмина, С. Ю. Огородникова XVII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения»243

CONTENTS

REVIEWS

L. I. Domracheva, S. G. Skugoreva, P. A. Starikov, E. A. Gornostaeva, T. Ya. Ashikhmina Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review)6
L. K. Kish, A. V. Tretyakov, O. I. Lavrukhina, V. G. Amelin, M. A. Gergel, N. V. Mishchenko Transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and raw materials (analytical review)15
N. V. Syrchina, L. V. Pilip, T. Ya. Ashikhmina Control of odor pollution of atmospheric air (review)26

ARTICLES

T. I. Kutyavina, V. V. Rutman, T. Ya. Ashikhmina Using digital maps to identify areas of mass development of phytoplankton in small freshwater reservoirs35
N. Das, A. Mondal, S. Mandal Maximum entropy modelling for predicting the potential distribution of methanogens in Sundarban mangrove ecosystem, India42
D. G. Sycheva, N. E. Kosheleva, I. V. Timofeev Contamination of soil cover with compounds of metals, arsenic and antimony in the area of impact of fuel and energy complex48
O. A. Loskutova, O. N. Kononova Zoobenthos and zooplankton of the foothill lakes of Subpolar Urals56
T. A. Pristova The chemical composition of atmospheric precipitation, throughfall and surface waters in the middle taiga deciduous stands of pos-cutting origin63
A. V. Elikov, P. I. Tsapok, E. M. Karpova, D. B. Loktev, V. A. Kozvonin, L. N. Shmakova The effect of dried blueberries and food products enriched with them on metabolic parameters of carbon tetrachloride intoxication70

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

MONITORING NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED AREAS

CHEMISTRY OF NATURAL ENVIRONMENTS AND OBJECTS

ECOTOXICOLOGY

ECOTOXICOLOGY

- A. I. Fokina, S. G. Skugoreva, L. V. Trefilova, L. V. Darovskikh* Determination of oxidative stress indicators in *Melissa officinalis* under the action of micromycete *Fusarium culmorum* and its antagonists77
- S. Yu. Ogorodnikova, S. V. Pestov, V. V. Zinoviev, A. P. Sofronov* Influence of phytopathogens on the content of plastid pigments and the intensity of lipid peroxidation processes in the leaves of woody plants84

ECOLOGIZATION OF PRODUCTION

- A. A. Malyshev, N. N. Solodkov, N. A. Korobkova* Formation of a green production management model93
- T. S. Ulanova, M. V. Volkova, G. A. Veikhman, A. V. Nedoshitova* To the question of methodological support for determination of rare earth elements for industrial inspection101

POPULATION ECOLOGY

- A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova* Utilization of wastewaters as a nutrient medium for the accumulation of microalgal biomass 109
- L. N. Anan'ina, I. A. Kosheleva, E. G. Plotnikova* Bacterial consortium as a model for studying the response of the microbial community of the Verkhnekamsk salt mining region to combined pollution116
- O. S. Filimonova, M. N. Belitskaya, I. R. Gribust* Distribution features of *Xanthogaleruca luteola* (Coleoptera: Chrysomelidae) in the protective plantings of the Lower Volga124
- A. P. Kaledin, S. V. Beketov, D. V. Zhukov, V. I. Fertikov, V. M. Makeeva, A. V. Smurov, A. M. Ostapchuk, E. A. Konorov, Yu. A. Stolpovskiy* Microsatellite analysis of populations of the ussuri sika deer acclimatized in the European part of Russia 130
- V. V. Stepanova, A. V. Argunov, D. I. Tirskiy, R. A. Kirillin, I. M. Okhlopkov* Lithophage *Alces alces* L. in the protected territories of Yakutia 138

REMEDICATION AND RECULTIVATION

- I. A. Likhonova, E. G. Kuznetsova, E. M. Lapteva* An unconventional approach to solving the problem of restoring damaged ecosystems in the North 145
- L. P. Rybashlykova* Dynamics of vegetation of the phytomeliorated deflation zone on the territory of the Republic of Kalmykia 152
- A. N. Bupalov, N. A. Sokolova, D. A. Sokolov* Specifics of biogeocenoses restoration during overgrowth of coal-mine dumps of the Gorlovsky basin 159
- E. S. Shirokova, E. V. Tovstik, A. V. Sazanov* Degradation of poly(ϵ -caprolactone) under laboratory conditions during exposure to air and soil 165

AGROECOLOGY

- I. G. Shirokikh, I. V. Liskova, Ya. I. Nazarova, T. P. Gradoboeva, S. S. Pislegina, N. A. Bokov, R. I. Abubakirova* Local strains of actinobacteria protect peas (*Pisum sativum* L.) from harmful infections 173
- A. G. Kosmacheva, S. M. Chesnokova, T. A. Trifonova* Study of the effect of antibiotics on the urease activity of sod-podzolic and gray forest soils 183
- A. V. Ilinskiy, V. N. Selmen, E. V. Selmen, S. D. Karyakina, M. S. Matyukhin, V. V. Grebennikova* The use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the greening of urban areas 191

ECOLOGY AND CLIMATE CHANGE

- J. M. Bambalan, I. K. S. Palapal, R. V. Guleng, E. E. Coracero, R. B. J. Gallego, M. J. A. Suniega* Tree diversity and carbon stock in North Poblacion and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines)198
- Y. M. Gordeeva, I. E. Vedernikova* Forest carbon offsets in Russia: current legal infrastructure209

SOCIAL ECOLOGY

- A. M. Tortsev* Problems of legal regulation of commercial use and conservation of fishery resources216
- L. S. Akhmedova, A. A. Gadzhiev, N. O. Guseynova* System approach as a scientific paradigm of natural science knowledge222
- A. A. Sozinova, V. A. Bondarenko, M. Smokova, N. G. Rumyantsev* Actualization of the "green" image for territorial development228
- S. V. Ermolaeva, E. O. Ivanov* Analysis of the cytogenetic status of children and adolescents in the living in areas with different environmental conditions 234

INFORMATION

- To the anniversary of L. I. Domracheva 241
- T. Ya. Ashikhmina* Journal "Theoretical and Applied Ecology" improved and developed242
- T. Ya. Ashikhmina, S. Yu. Ogorodnikova* XVII All-Russian scientific and practical conference with international participation "Ecology of the native land: problems and ways to solve them"243

Микробы-антагонисты против фитопатогенных бактерий и грибов (обзор)

© 2022. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор,
С. Г. Скугорева¹, к. б. н., н. с., П. А. Стариков², аспирант,
Е. А. Горностаева³, к. б. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: dli-alga@mail.ru

Мировое сельское и лесное хозяйство несёт огромный ущерб от инфекционных болезней, вызываемых в основном фитопатогенными грибами и бактериями. Гибель растений наступает вследствие способности фитопатогенов продуцировать гидролитические экзоферменты, разрушающие покровные барьеры растительной клетки. Кроме того, в заражённой клетке возникают патологические процессы, обусловленные синтезом токсинов и способностью паразитов блокировать определённые метаболические реакции. Опасность инфекций состоит не только в гибели урожая на корню и в процессе его хранения, но и в сохранности токсинов, оказывающих сильное специфическое действие на организм человека и животных, употребляющих в пищу и корм продукты, содержащие токсины, многие из которых не разрушаются даже в процессе термической обработки.

Наиболее известны способы защиты растений от инфекций, связанные с применением пестицидов, использование которых имеет ряд отрицательных последствий. Альтернативой химическим средствам защиты уже более 50 лет служат микробы-антагонисты различных систематических групп. Благодаря выделению антибиотиков и других биологически активных веществ, они способны ограничивать численность фитопатогенов, могут конкурировать за пространство на корнях растений и выступать в качестве барьера на пути проникновения вредных микробов внутрь растительной клетки. Круг микробов-антагонистов широк, включает представителей как прокариотов (грамположительные и грамотрицательные бактерии рр. *Bacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*, цианобактерии), так и эукариотов, в первую очередь, микромицетов р. *Trichoderma*.

Ключевые слова: болезни растений, эпифитотии, микробный антагонизм, механизмы антагонистических взаимодействий, биологическая защита.

Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review)

© 2022. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, S. G. Skugoreva¹ ORCID: 0000-0002-5902-5187,
P. A. Starikov² ORCID: 0000-0002-3205-6696, E. A. Gornostaeva³ ORCID: 0000-0003-4888-5736,
T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,
³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: dli-alga@mail.ru

in the infected cell due to the synthesis of toxins and the ability of parasites to block certain metabolic reactions. The danger of infections lies not only in the death of the crop on the vine and during its storage, but also in the preservation of toxins that have a strong specific effect on the human body and animals that eat and feed products containing toxins, many of which are not destroyed even during heat treatment.

The most well-known methods of protecting plants from infections associated with the use of pesticides, the use of which has a number of negative consequences. Antagonist microbes of various systematic groups have been serving as an alternative to chemical means of protection for more than 50 years. Due to the release of antibiotics and other biologically active substances, they are able to suppress the reproduction of pathogens, can compete for space on the roots of plants and act as a barrier against the penetration of harmful microbes into the plant cell. The range of microbial antagonists is wide, including representatives of both prokaryotes (gram-positive and gram-negative bacteria of genera *Bacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*, cyanobacteria) and eukaryotes, primarily micromycetes g. *Trichoderma*.

Keywords: plant diseases, epiphytiosis, microbial antagonism, mechanisms of antagonistic interactions, biological protection.

В настоящее время насчитывается около 500 тыс. видов растений, из которых примерно 100 видов выращивают как основные продовольственные и технические культуры. При этом одной из основных причин возникновения эпифитотий является возделывание монокультур, восприимчивых к возбудителю инфекции на обширных территориях, где его распространение происходит быстро от растения к растению. Эпифитотии наносят значительный урон, а если поражаются культуры, являющиеся основным продуктом питания людей, то последствия могут быть катастрофическими [1].

По данным продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН – Food and Agriculture Organization (FAO) потери, связанные с заболеваниями и снижением качества сельскохозяйственной продукции в процессе хранения, составляют 30–40%. Согласно данным за 2021 г., экономические потери от болезней растений превышают 220 млрд долларов США в год [2].

Опасность болезней сельскохозяйственных культур выражается не только в гибели растений или потерях урожая, но и в снижении его качества из-за загрязнения сельскохозяйственной продукции токсинами бактериального и грибного происхождения.

С болезнями растений человечество сталкивалось с незапамятных времён. Например, в средние века эпидемии «Антониевого огня» были вызваны отравлениями людей токсинами гриба спорыньи (*Claviceps purpurea*), паразитирующего на озимой пшенице и ржи [3]. При попадании в организм человека алкалоиды спорыньи вызывают длительные спазмы гладкой мускулатуры, судороги, расстройства нервной системы, а при больших дозах вызывают летальный исход [4].

В середине XIX века во многих странах Западной Европы появился фитофтороз картофеля (*Phytophthora infestans*), что стало

причиной голода в Ирландии в 1845–1849 гг. [5]. В 1880 г. эпифитотия ржавчины (*Hemileia vastatrix*) погубила весь урожай кофе на острове Цейлон. В XIX веке во Франции эпифитотия оидиума винограда (*Uncinula necator*) привела к резкому снижению производства вина (до 80%) [3].

В настоящее время фитосанитарная обстановка в агроценозах, в том числе и на территории России, характеризуется эпизодическими вспышками инфекционных заболеваний, вызванных различными патогенами. Так, по данным 2016–2018 гг. [6] в посевах зерновых культур в России существует риск развития септориоза (р. *Septoria*) с опасностью снижения продуктивности на 30%, мучнистой росы (*Blumeria graminis*) – на 20%, бурой ржавчины (*Puccinia recondita*) – на 17%, головни (рр. *Tilletia*, *Urocystis*, *Ustilago*) – на 20–30%. Потери урожая при поражении риса пирикулярриозом (*Pyricularia oryzae*) составляют 90%; картофеля фитофторозом (*Phytophthora infestans*) – 70% и более [7].

Фузариоз (р. *Fusarium*) зерна – широко распространённое в мире заболевание, снижающее урожай на 50% и более. Анализ фитосанитарного состояния семян яровой пшеницы из Новосибирской, Томской, Кемеровской, Тюменской областей, Алтайского и Красноярского краёв за период 2012–2018 гг. показал, что все партии зерна инфицированы фузариями, причём заражённость отдельных партий составляла 60–70%, многократно превышая порог вредоносности (10%), что соответствовало уровню сильной эпифитотии [8].

При заражении фузариевыми грибами продовольственного зерна главной опасностью становится способность возбудителей синтезировать микотоксины (зеараленон, трихотеценовые микотоксины и др.), которые приводят к возникновению серьёзных заболеваний у человека и животных [9, 10].

Громадные потери терпит от инфекционных болезней и лесное хозяйство. Микозы широко распространены, очень вредоносны и причиняют лесному хозяйству большой ущерб. Среди основных возбудителей болезней семян и саженцев хвойных можно назвать представителей рр. *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Alternaria*, *Pythium* [11, 12].

Цель работы – на основе анализа литературных данных оценить возможности отдельных групп микробов-антагонистов противостоять болезням растений, вызываемых фитопатогенными микромицетами и бактериями.

Объекты и методы исследования

Объектом литературного обзора является анализ биохимических и физиологических возможностей микробов-антагонистов, способных подавлять развитие фитопатогенов и тем самым обеспечивать защиту растений от инфекционных заболеваний. Для обзора использованы литературные источники (1956–2021 гг.) из базы данных научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, включающей публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике. Поиск источников проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по поисковым запросам на русском языке: «фитопатогены», «микробы-антагонисты», «эпифитотии», «механизм инфекции», а также на английском языке: «phytopathogens», «antagonistic microorganisms», «epiphytotics», «mechanism of infection». Найденную информацию анализировали в соответствии с заявленными разделами статьи.

Физиологические и биохимические возможности фитопатогенов в развитии инфекционного процесса у растений

Паразитизм как биологическое явление является прогрессивной тенденцией у организмов, которая позволяет им расширять пищевую и территориальную базу. В некоторых случаях люди сознательно используют паразитов для борьбы с нежелательными организмами, в частности, для подавления численности грызунов и насекомых-вредителей. В то же время паразитизм представляет огромную опасность при заражении людей, животных и растений. Выделяют особую группу паразитов – микробов-фитопатогенов, среди которых

есть факультативные (оппортунистические формы) и облигатные. Началом паразитических, как и мутуалистических отношений, является колонизация поверхности корней и надземной части растений как специфической среды обитания, богатой питательными веществами за счёт выделения значительного количества экзометаболитов, среди которых встречаются аминокислоты, органические кислоты, сахара [13]. Однако в случае мутуализма возникает взаимовыгодное сожительство, тогда как при паразитизме пользу от сожительства получает только один партнёр, угнетая организм хозяина. Основой проникновения внутрь и дальнейшего развития фитопатогенов является синтез экзоферментов (целлюлаз, амилаз, пектиназ, протеаз), гидролизующих наружные покровы и компоненты цитоплазматической мембраны растительной клетки [13, 14].

Фитопатогены очень разнообразны и многочисленны. Среди эукариотов наиболее распространёнными и опасными являются микромицеты [15]. По ориентировочным подсчётам существует не менее 10000 видов фитопатогенных грибов [16].

Микозы растений – одна из самых распространённых причин гибели посевов в сельском хозяйстве. Основными возбудителями заболеваний растений являются представители рр. *Fusarium*, *Alternaria*, *Microdochium*, *Phytophthora* и др. [17].

В зависимости от стратегии, к которой прибегают грибы для «захвата» растения-хозяина, их делят на 3 группы:

- некротрофы убивают клетки растительных тканей, после чего заселяют поражённый участок и поглощают из него питательные вещества;
- биотрофы извлекают необходимые вещества непосредственно из живых клеток;
- гемибитрофы сначала питаются биотрофно, а после гибели заражённых тканей продолжают жить на них как некротрофы [18].

На сегодняшний день большое количество исследований посвящено заболеваниям и токсикозам, связанным с развитием грибов р. *Fusarium* [19–22]. Существенную опасность представляют фузариотоксины (Т-2 токсин, НТ-2 токсин, дезоксиневаленол, ниваленол и др.). Доказано, что фузариин способны продуцировать свыше 150 токсинов. При этом некоторые токсины оказывают одинаковое воздействие на клетки растений, животных и человека, другие обладают специфическим

воздействием на организмы различных систематических групп. Основные воздействия фузариотоксинов на растительную клетку проявляются в повреждении ДНК, блокаде клеточного цикла, возникновении окислительного стресса, ингибировании синтеза белка, нарушении процесса фотосинтеза с последующим возникновением некрозов тканей и органов.

Грибы р. *Fusarium* способны колонизировать кортикальный слой клеток, поражать сосуды. Гифы заселяют сначала межклеточное пространство, а затем внедряются в клетки. Обилие внутри- и внеклеточных гиф приводит к коллапсу остальных неинфицированных клеток. Затем гифы разрывают эпидермис и формируют воздушный мицелий [23].

Помимо микозов, растения страдают и от бактериозов. К фитопатогенным относят 150–200 видов бактерий [16]. Среди них одним из самых распространённых фитопатогенов на европейской части России является возбудитель базального бактериоза зерновых *Pseudomonas syringae*. Этот вид способен поражать до 70% урожая некоторых сортов пшеницы и ячменя [24].

Стратегии колонизации бактериями организма хозяина достаточно разнообразны: от разрушения клеток литическими ферментами до внедрения в геном растения части своей плазмидной ДНК [25].

Внешне болезни у растений могут проявиться в различных формах: в виде гнили, мумификации, увядания, налётов. Многие возбудители болезней вызывают у растений образование галлов, вздутий, наростов, приводят к гипертрофии, гипер- и гипоплазии, дегенерации и некрозу [26].

Одним из перспективных путей выявления бактерий-фитопатогенов и их антагонистов является метод дрим-генотипирования (двойного расщепления и избирательного мечения), разработанный в последние годы, который позволяет идентифицировать возбудителей заболевания с полной характеристикой их наследственного материала [27]. Используя данный метод, авторам удалось изучить генетические профили бактерий-фитопатогенов рр. *Pseudomonas*, *Pectobacterium* и их антагонистов *Bacillus subtilis*.

Изучение экологии, физиологических и биохимических особенностей фитопатогенов даёт возможность отбирать наиболее эффективные штаммы микробов-антагонистов для борьбы с инфекциями растений.

Физиологические и биохимические возможности микробов-антагонистов в подавлении фитопатогенов

В системе интегрированной защиты растений, включающей правильную систему земледелия, агротехнику и селекцию иммунных сортов, разумное применение пестицидов, необходимо шире использовать биологические методы защиты растений [28, 29]. Поиск микробов-антагонистов начался сравнительно давно и продолжается до сих пор [30, 31]. В этом плане остаются наиболее популярными представители рр. *Pseudomonas* [32–34] и *Bacillus* [35–37]. Анализ метаболитов этих бактерий показал, что, помимо антибиотиков, важную роль в защите растений от болезней играют липопептиды, подавляющие рост и развитие родственных фитопатогенных видов и обладающие более широким спектром биоцидного действия (бактерицидное, фунгицидное, инсектицидное и противовирусное) [38].

Сильнейшим антагонистическим потенциалом против фитопатогенов обладают и древнейшие организмы планеты – цианобактерии (ЦБ). Цианобактерии способны синтезировать и выделять в окружающую среду значительное количество разнообразных биологически активных веществ. В состав экссудатов ЦБ входят полисахариды, сахара, органические кислоты, пептиды, аминокислоты, алкалоиды, токсины, антибиотики, сапонины, фенольные соединения [39–42]. Экзометаболиты различной химической природы характерны как для водных, так и для почвенных форм ЦБ. Существенный практический интерес представляют штаммы почвенных ЦБ, синтезирующие внеклеточные вещества антигрибного действия. Фунгицидная активность доказана у многих видов ЦБ, относящихся к рр. *Nostoc*, *Fischerella*, *Anabaena* [43, 44]. Установлено, что высокая степень антагонистической активности по отношению к фитопатогенным бактериям и грибам характерна для таких экзометаболитов ЦБ, как липопептид ностокофунгицидин, циклический полимер парсигин, алкалоиды амбигол А, амбигол Б и фишереллин. При этом степень антагонистической активности ЦБ усиливается в процессе формирования многовидовых биоплёнок.

Ещё одной уникальной группой природных антагонистов фитопатогенов являются мицелиальные прокариоты – актиномицеты. Проведены многочисленные исследования, показавшие возможность использования поч-

венных актиномицетов для биологического контроля фитопатогенов [45–48]. Существует определённое сходство микромицетов и актиномицетов по местообитаниям, спектру используемых ресурсов, кинетике роста, способности к образованию вторичных метаболитов. Хотя чаще всего биомасса актиномицетов в почве существенно меньше биомассы грибов, они в определённой степени способны регулировать развитие микромицетов, поселяясь не только на отмирающих гифах, но и угнетать прорастание спор фитопатогенных грибов, в частности, представителей р. *Fusarium*, вызывать многочисленные морфологические аномалии в развитии грибных гиф и, в конечном итоге, их лизис. Наиболее активно подобные процессы протекают в ризосфере. Ещё один аспект положительного действия актиномицетов в ризосфере заключается в том, что под их влиянием происходит возрастание устойчивости растений к заболеваниям за счёт активации системной приобретённой резистентности и индуцированной системной резистентности [49].

Механизмы, с помощью которых актиномицеты способствуют росту растений: повышение доступности питательных веществ, регуляция метаболизма растений, снижение экологического стресса, контроль фитопатогенов, улучшение текстуры почвы [50–52].

Среди механизмов антибиоза актиномицетов к фитопатогенам отмечают следующие: выделение гидролитических экзоферментов (хитиназа, глюканаза), антибиотиков, сидерофоров, АЦК-дезаминаз. Известны также примеры гиперпаразитизма, обусловленного возможностью развития актиномицетов на мицелии грибов с последующим лизисом [45].

Выделение активных штаммов актиномицетов продолжается не только из различных типов почв. Существуют исследования, в которых обнаружен антагонизм актиномицетов против фитопатогенов *Alternaria solani*, *Aspergillus flavus*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium* spp., изолированных с кутикулы тела обитающих в Мексике муравьёв, разводящих для прокорма «грибные сады» [53, 54].

Среди микробов-антагонистов, используемых для создания биопрепаратов, имеются явные лидеры, к числу которых, например, относятся грибы р. *Trichoderma*. Наряду с антимикробными свойствами, некоторые представители данного рода способны стимулировать рост растений за счёт продукции гормонов [55] и участия в мобилизации труднодоступных почвенных элементов питания [56]. Одно из

наиболее экономически значимых направлений использования триходермы в земледелии связано с её антимикробными свойствами. В настоящее время известно 200 вторичных метаболитов грибов р. *Trichoderma*, часть которых обладает высокой биологической активностью [57].

Прямой паразитизм, конкуренция и антибиоз – это те ключевые биологические стратегии, которые представители р. *Trichoderma* используют для контроля распространения фитопатогенов [58].

В основе механизма формирования паразитических отношений лежит способность некоторых штаммов *Trichoderma* spp. к прямой атаке других биологических видов и использованию их как источника питания [59]. Прежде всего, эта способность триходермы развита в отношении других микромицетов, поэтому данное явление получило название «микопаразитизм». В основе этого сложного процесса – несколько ключевых стадий. Проявлению прямого паразитизма предшествует хемотропизм, когда гифы триходермы начинают активно разветвляться и расти в сторону организма-мишени. За этим этапом следует специфичное распознавание, обусловленное способностью углеводов клеточной стенки триходермы специфически связываться с лектинами мишени. Затем происходит обвивание гиф хозяина гифами *Trichoderma* и последующее формирование апрессорий – специализированных видоизменений мицелия, которые содержат большие количества осмотически активных соединений. Апрессории запускают процесс пенетрации мишени, после чего происходит атака её клеточного аппарата за счёт секреции паразитом глюканаз, хитиназ и протеаз, лизирующих клеточную стенку. Отмечается, что ферменты триходермы даже в условиях *in vitro* способны угнетать развитие ряда фитопатогенов. В частности, хитиназа *T. asperellum* в экспериментах значительно подавляла рост *Colletotrichum* sp. (около 95%) и *Sclerotium rolfii* (около 97%) [60]. Кроме того, проведены лабораторные опыты с использованием препаратов ферментов *Trichoderma* spp., которые показали, что обработанные яблоки в хранилище меньше поражаются *Bacillus cinerea*, а в тепличных условиях снижается процент поражения клубники микромицетами р. *Colletotrichum* [61]. Это открывает перспективу разработки и производства ферментных препаратов для защиты растений, наряду с живыми культурами триходермы.

Следующим ключевым механизмом био-контроля является формирование конкурентных взаимоотношений между грибами р. *Trichoderma* и другими микроорганизмами, включая фитопатогенные виды. В природе представители *Trichoderma* spp. конкурируют с патогенами растений не только за питательные вещества, количество которых в окружающей среде сильно лимитировано, но и за биологические ниши или места колонизации в ризосфере растений. Развитая способность к мобилизации и поглощению питательных веществ из почвы является важным конкурентным преимуществом грибов р. *Trichoderma* в сравнении с прочими представителями ризосферной микробиоты [58].

Один из основных механизмов конкуренции связан с продукцией сидерофоров грибами р. *Trichoderma*. Эти низкомолекулярные биологически активные вещества обеспечивают способность триходермы к эффективному поглощению нерастворимых соединений железа из почвы [62]. Данный механизм не только улучшает обеспеченность растений ионами железа, но и позволяет триходерме препятствовать поглощению этого элемента фитопатогенами. В частности, харзиановая кислота, продуцируемая одним из штаммов *T. harzianum* и выступающая в качестве сидерофора, показала антимикробную активность в отношении таких грибов, как *Pythium irregulare*, *Sclerotinia sclerotiorum* и *Rhizoctonia solani* [63].

Для биологического контроля фитопатогенов ряд штаммов *Trichoderma* spp. использует механизм секреции низкомолекулярных антимикробных соединений, т. е. процесс антибиоза. Последний связан со способностью триходермы к синтезу ряда вторичных метаболитов с высокой антибиотической активностью, которые подразделяются на такие основные группы, как пептаиболы, поликетиды и терпены [58].

Пептаиболы являются наиболее изученными соединениями с антибиотическими свойствами, продуцируемыми грибами р. *Trichoderma*. Это вещества полипептидной природы с молекулярной массой 500–2000 Да, которые содержат непротеиногенные аминокислоты, преобладающей из которых является гомоаланин [64]. За счёт своей амфипатической природы, а именно, наличия ацетилированного N-конца и C-конца, содержащего аминспирты, пептаиболы способны формировать потенциалзависимые ионные каналы в мембранах клетки-мишени,

что приводит к гибели последней [58]. Среди видов, продуцирующих пептаиболы с антимикробными свойствами, выделяются *T. koningii*, *T. harzianum*, *T. longibrachiatum*, а также *T. asperellum* [64].

В последнее время проводятся исследования антибиотических свойств не только водорастворимых веществ, но летучих органических соединений, продуцируемых представителями *Trichoderma* spp. Для изучения активности летучих соединений были протестированы специальные камеры, которые позволяют исключить воздействие прочих метаболитов на исследуемые культуры. В частности, описаны эксперименты, доказывающие, что накопление таких соединений в атмосфере камеры оказывало влияние на рост культур фитопатогенов в условиях отсутствия вентиляции [65]. Таким образом, поиск и исследование летучих антибиотических соединений триходермы открывает перспективу создания новых биофумигантов для защиты от патогенных грибов.

В настоящее время в мире имеется более 50 зарегистрированных препаратов на основе триходермы. При изучении триады взаимоотношений грибы р. *Trichoderma* – высшие растения – фитопатогены получено много данных о том, каким образом эти грибы находят возбудитель, взаимодействуют с растением и защищают себя от токсикантов [61].

Заключение

В данном обзоре приведена краткая характеристика основных механизмов паразитизма фитопатогенов, а также основы антагонистической активности агрономически полезных микробов против возбудителей болезней растений.

Многочисленными исследованиями доказано, что основными путями поражения растительных клеток является выделение ферментов, разрушающих структуры клеток, и синтез токсинов, нарушающих процессы метаболизма растительной клетки.

Среди методов защиты растений от фитопатогенов в течение нескольких десятилетий используются микробы-антагонисты различной систематической принадлежности. Среди антагонистов известны представители прокариотов и эукариотов. Наиболее активные прокариоты-антагонисты, используемые для создания биопрепаратов, – это представители рр. *Bacillus* и *Pseudomonas*. Большим антагонистическим потенциалом обладают предста-

вители отдельных родов ЦБ и актиномицетов. К эукариотным антагонистам, в первую очередь, относятся микромицеты из р. *Trichoderma*. Все известные антагонисты фитопатогенов обладают свойствами, позволяющими им задерживать развитие или убивать болезнетворные микробы. К таким свойствам относится способность синтезировать антибиотики, экзоферменты, сидерофоры, АЦК-деаминазу. Подобная активность антагонистов является основой для создания биопрепаратов в защите растений от инфекций. Неслучайно в мировой практике сельского хозяйства биопрепараты на основе микробов-антагонистов находят широкое применение.

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

References

1. Minnakhmetova L.T., Minnakhmetov R.R., Misbakhov A.A., Sitdikova A.A. Biological emergencies. Kazan: Vestfalika, 2013. 123 p. (in Russian).
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. New standards to curb the global spread of plant pests and diseases [Internet resource] <https://www.fao.org/news/story/en/item/1187738/icode/> (Accessed: 22.12.2021).
3. Savary S., Ficke A., Aubertot J.-N., Clayton H. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security // *Food Sec.* 2012. V. 4. P. 519–537. doi: 10.1007/s12571-012-0200-5
4. Glazer G., Myers K.A., Davies E.R. Ergot poisoning // *Postgraduate Medical Journal.* 1966. V. 42. No. 491. P. 562–568. doi: 10.1136/pgmj.42.491.562
5. Haas B.J., Kamoun S., Zody M.C., Jiang R.H.Y., Handsaker R.E. Genome sequence and analysis of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* // *Nature.* 2009. V. 461. P. 393–398. doi: 10.1038/nature08358
6. Zakharenko V.A. Economics of assessing the manifestation of mycoses and anticipating epiphytotics of strategic crops // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK.* 2020. V. 34. No. 12. P. 95–98 (in Russian). doi: 10.24441/0235-2451-2020-11216
7. Ordobaev B.S., Abdikeev S.S., Musuralieva D.N. Biological emergencies, preventive measures and methods of protection: an educational and methodological manual. Belgorod: KRSU, 2015. 60 p. (in Russian)
8. Toropova E.Yu., Vorobieva I.G., Mustafina M.A., Selyuk M.P. Fungi of the genus *Fusarium* on wheat grain in Western Siberia [Internet resource] <https://glavagronom.ru/articles/griby-roda-fusarium-na-zerne-pshenicy-v-zapadnoi-sibiri> (in Russian) (Accessed: 22.12.2021).
9. Monastyrsky O.A. Mycotoxins – a global problem of food and feed safety // *Agrokhimiya.* 2016. No. 6. P. 67–71 (in Russian).
10. Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P., Orina A.S. First detection of *Fusarium globosum* in small grain cereals on Ural and Siberian territory // *Vestnik zashchity rasteniy.* 2019. V. 1 (99). P. 10–18 (in Russian). doi: 10.31993/2308-6459-2019-1(99)-10-18
11. Koshnikov V.I., Fedorovich E.E. Microbiology of soil and seedlings in Scots pine crops // *Plant pests and diseases: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov.* Novosibirsk: Novosibirskiy Gosudarstvennyy Agrarnyy universitet, 2000. P. 79–83 (in Russian).
12. Litovka Yu.A., Gromovych Yu.I. Species composition and pathogenicity of fungi of the genus *Fusarium* on seedlings of coniferous species in forest nurseries of Central Siberia // *Mycology and Phytopathology.* 2008. V. 42. No. 1. P. 35–42 (in Russian).
13. Aleandri M.P., Chilosi G., Magro P. Pectolytic enzymes produced by *Fusarium culmorum* *in vitro* and during colonization of wheat seedlings // *J. Plant Pathol.* 2004. V. 86. No. 4. Article No. 295.
14. Ievleva E. V., Revina T.A., Kudryavtseva N.N., Sofin A.V., Valueva T.A. Extracellular proteinases of the phytopathogenic fungus *Fusarium culmorum* // *Applied Biochemistry and Microbiology.* 2006. V. 42. No. 3. P. 338–344 (in Russian).
15. Evdokimova E. Infectious diseases of plants // *Journal “Zelenayastrela”* [Internet resource] <https://zstrela.ru/projects/magazine/sections/bolezni-i-vrediteli/infekcionnye-bolezni-rasteniy> (Accessed: 22.12.2021) (in Russian).
16. Pérez-García A., Romero D., Zerriouh H., de Vicente A. Biological control of phytopathogenic fungi by aerobic endospore-formers // *Endospore-forming Soil Bacteria. Soil Biology / Eds. N. Logan, P. Vos.* Berlin: Springer-Verlag, 2011. V. 27. P. 157–180. doi: 10.1007/978-3-642-19577-8_8
17. Levitin M.M. Phytopathogenic fungi and human diseases // *Zashchita i karantin rasteniy.* 2009. V. 1. P. 24–25 (in Russian).
18. Chikin Yu.A. General phytopathology. Tomsk: Tomsk State University, 2001. Part 1. 170 p. (in Russian).
19. Logrieco A., Mule G., Moretti A., Bottalico A. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with maize ear in Europe // *Mycotoxins in Plant Disease.* 2002. V. 108. No. 7. P. 597–609. doi: 10.1023/a:1020679029993
20. Domracheva L., Trefilova L., Fokina A. *Fusaria*: biological control and sorption capabilities. LAP: Lambert Academic Publishing, 2013. 182 p. (in Russian).
21. Ochapkina V.Yu., Khanzhin A.A. Ecological and epidemiological significance of micromycetes of the genus *Fusarium* // *Theoretical and Applied Ecology.* 2012. No. 2. P. 5–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-005-014

22. 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: 10.25750/19954301-2021-1-006-015
23. Brown N.A., Urban N.M., Van de Meene A.M.L., Hammond-Kosac K. E. The infection biology of *Fusarium graminearum*: defining the pathways of spikelet colonization in wheat ears // Fungal Biology. 2010. V. 114. No. 7. P. 555–571. doi: 10.1016/j.funbio.2010.04.006
24. Ignatov A. Bacterioses in Russia: the threat is real [Internet resource] <https://www.agroxxi.ru/gazeta-zaschita-rastenii/zrast/bakteriozy-v-rossii-ugroza-realna.html> (Accessed: 22.12.2021) (in Russian).
25. Zheldakova R.A., Myamin V.E. Phytopathogenic microorganisms. Minsk: BSU, 2006. 116 p. (in Russian).
26. Abdulkhair W.M., Alghuthaymi M.A. Plant pathogens // Plant Growth / Ed. E.C. Rigobelo. Intech Open, 2016. 232 p. [Internet resource] <https://www.intechopen.com/chapters/52387> (Accessed: 22.12.2021). doi: 10.5772/65325
27. Terletskiy V.P., Lazarev A.M., Novikova I.I., Boykova I.V., Zeyruk V.N. On dream genotyping of pathogens of potato bacterioses, their antagonists and destructor bacteria for solving problems of plant protection and ecology // Agricultural Biology. 2021. V. 56. No. 5. P. 910–923 (in Russian). doi: 10.15389/agrobio.2021/5/910rus
28. Cycoń M., Piotrowska-Seget Z. Response of soil microflora to pesticides introduced into soil: a review // Pestycydy. 2007. No. 1–2. P. 63–82. doi: 10.1201/b11864-12
29. Protection of plants from diseases / Ed. V.A. Shkalikov. Moskva: Koloss, 2010. 404 p. (in Russian).
30. Krasilnikov N.A. Soil microorganisms and higher plants. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1958. 465 p. (in Russian).
31. Pozdnyakov V.N. Soil bacteria-antagonists of phytopathogenic microflora // Biotechnology. 1998. No. 1. P. 29–32 (in Russian).
32. Smirnov V.V., Kiprianova E.A. Bacteria of the genus *Pseudomonas*. Kiev: Naukova dumka, 1990. 264 p. (in Russian).
33. Rafikova G.F., Korshunova T.Yu., Minnebaev L.F., Chetverikov S.P., Loginov O.N. A new bacterial strain *Pseudomonas korensis* IB-4 as a promising agent for the biological control of phytopathogens // Microbiology. 2016. V. 85. No. 3. P. 317–326 (in Russian).
34. Anokhina T.O., Siunova T.V., Sizova O.I., Zakharchenko N.S., Kochetkov V.V. Rhizospheric bacteria of the genus *Pseudomonas* in modern agrobiotechnologies // Agrochemistry. 2018. No. 10. P. 54–66 (in Russian).
35. Shternshis M.V., Belyaev A.A., Shtatova T.V., Lutov V.I., Lelyak A.I. Strains of bacteria of the genus *Bacillus* as a potential basis for biological preparations for the control of diseases of berry crops // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2011. No. 10. P. 8–10 (in Russian).
36. Abd-Allah E.F., Ezzat S.M., Tohamy M.R. *Bacillus subtilis* as an alternative biologically based strategy for controlling *Fusarium* wilt disease tomato: A histological study // Phytoparasitica. 2007. V. 35. No. 5. P. 474–478. doi: 10.1007/bf03020606
37. Sidorova T.M., Asaturova A.M., Khomyak A.I. Biologically active metabolites of *Bacillus subtilis* and their role in the control of phytopathogenic microorganisms // Agricultural Biology. 2018. V. 53. No. 1. P. 29–37 (in Russian).
38. Maksimov I.V., Singkh B.P., Cherepanova E.A., Burkhanova G.F., Khayrullin R.M. Prospects for the use of bacteria – producers of lipopeptides for plant protection (review) // Applied Biochemistry and Microbiology. 2020. V. 56. No. 1. P. 19–34 (in Russian).
39. Namikoshi M., Rinehart K.L. Bioactive compounds produced by cyanobacteria // Journal of Industrial Microbiology. 1996. V. 17. No. 5–6. P. 373–384. doi: 10.1007/BF01574768
40. Sing S., Kate B.N., Banerjee U.C. Bioactive compounds from cyanobacteria and cicroalgae: an overview // Critical Reviews in Biotechnology. 2005. V. 25. P. 73–95. doi: 10.1080/07388550500248498
41. Bhattacharyya S., Deep P.R., Nayak B., Panigrahi M., Mohapatra B. Antimicrobial activity of two diazotropic cyanobacteria against *Staphylococcus aureus* // Int. J. Med. Aromat. Plants. 2013. V. 42. No. 2. P. 283–292.
42. Devi K.M., Mehta S.K. Antimicrobial activity and GC-MS analysis of freshwater cyanobacterium *Fischerella ambigua* // World J. of Pharmaceutical and Medical Research. 2016. V. 2. No. 5. P. 199–208. doi: 10.20546/ijemas.2018.701.409
43. Domracheva L.I., Fokina A.I., Kovina A.L., Ashikhmina T.Ya. Exometabolites of soil cyanobacteria as a survival strategy in natural and technogenically disturbed ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 15–23 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-015-023
44. Domracheva L.I., Kovina A.L., Kondakova L.V., Ashikhmina T. Ya. Cyanobacterial symbioses and their practical use (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 21–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030
45. Vinogradova K.F., Kozhevin P.A. Interaction between actinomycetes and soil fungi in relation to the biological control of phytopathogens // Mycology and Phytopathology. 2011. V. 45. No. 4. P. 289–302 (in Russian).
46. Shirokikh I.G., Bakulina A.V., Nazarova Ya.I., Shirokikh A.A., Kozlova L.M. Effect of *Streptomyces castelarensis* A4 on the lesion by phytopathogenic micromycetes and the yield of grain crops of field rotation // Mycology and Phytopathology. 2020. V. 54. No. 1. P. 59–66 (in Russian). doi: 10.31857/S0026364820010080
47. Tovstik E.V., Shirokikh I.G., Domracheva L.I. Effect of cyanobacteria *Fischerella muscicola* and streptomycetes on plants in the model experiment // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 83–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-083-088

48. Domracheva L.I., Shirokikh I.G., Fokina A.I. Cyanobacteria and actinomycetes influence against *Fusarium* species in soil and rhizosphere // *Mycology and Phytopathology*. 2009. V. 43. No. 2. P. 157–165 (in Russian).
49. Silva G.C., Kitano I.T., Ribeiro I.A.F., Lacava P.T. The potential use of actinomycetes as microbial inoculants and biopesticides in agriculture // *Front. Soil Sci.* 2022. V. 2. Article No. 833181. doi: 10.3389/fsoil.2022.833181
50. Vurukonda S.S.K.P., Giovanardi D., Stefani E. Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes // *International Journal of Molecular Sciences*. 2018. V. 19. No. 4. Article No. 952. doi: 10.3390/ijms19040952
51. Palaniyandi S.A., Yang S.H., Zhang L., Suh J.W. Effects of actinobacteria on plant disease suppression and growth promotion // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2013. V. 97. No. 22. P. 9621–9636. doi: 10.1007/s00253-013-5206-1
52. Hamed J., Mohammadipناه F. Biotechnological application and taxonomical distribution of plant growth promoting Actinobacteria // *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 2015. V. 42. No. 2. P. 157–171. doi: 10.1007/s10295-014-1537-x
53. Sánchez-Peña S.R. Observations on aggression in leaf-cutting ant females *Atta mexicana* (Hymenoptera: Formicidae) in Mexico // *Entomological News*. 2008. V. 119. No. 5. P. 541–544. doi: 10.3157/0013-872X-119.5.541
54. Egos-Morales G., Sanchez-Arizpe A. *In vitro* antagonism of actinomycetes isolated from fungus-growing ants against plant pathogenic fungi // *Phytoparasitica*. 2008. V. 36. No. 4. P. 322–325. doi:10.1007/bf02980811
55. Hoyos-Carvajal L., Orduz S., Bissett J. Growth stimulation in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by *Trichoderma* // *Biological Control*. 2009. V. 51. No. 3. P. 409–416. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.07.018
56. Tandon A., Fatima T., Anshu, Shukla D., Tripathi P., Srivastava S., Sinh P.C. Phosphate solubilization by *Trichoderma koningiopsis* (NBRI-PR5) under abiotic stress conditions // *Journal King Saud University – Science*. 2020. V. 32. No. 1. P. 791–798. doi: 10.1016/j.jksus.2019.02.001
57. Ahluwalia V., Kumar J., Rana V.S., Sati O.P., Walia S. Comparative evaluation of two *Trichoderma harzianum* strains for major secondary metabolite production and antifungal activity // *Natural Product Research*. 2015. V. 29. No. 10. P. 914–920. doi: 10.1080/14786419.2014.958739
58. Sood M., Kapoor D., Kumar V., Sheteiw M.S., Ramakrishnan M., Landi M., Araniti F., Sharma A. *Trichoderma*: the “secrets” of a multitiered biocontrol agent // *Plants (Basel)*. 2020. V. 9. No. 6. Article No. 762. doi: 10.3390/plants9
59. Singh A., Shukla N., Kabadwal B.C., Tewari A.K., Kumar J. Review on plant-*Trichoderma*-pathogen interaction // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018. V. 7. No. 2. P. 2382–2397. doi: 10.20546/ijcmas.2018.702.291
60. Loc N.H., Huy N.D., Quang H.T., Lan T.T., Thu Ha T.T. Characterisation and antifungal activity of extracellular chitinase from a biocontrol fungus, *Trichoderma asperellum* PQ34 // *Mycology*. 2019. V. 11. No. 1. P. 38–48. doi: 10.1080/21501203.2019.1703839
61. Kolombet L.V. The triad of relationships: fungi of the genus *Trichoderma* – higher plants – phytopathogens // *Agrochemistry*. 2018. No. 11. P. 87–94 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188118070062
62. Sánchez-Espinosa A.C., Villarruel-Ordaz J.L., Maldonado-Bonilla L.D. The cause and potential solution to the *Fusarium* wilt disease in banana plants // *Terra Latinoamericana*. 2020. V. 38. No. 2. P. 435–442. doi: 10.28940/terra.v38i2.617
63. Vinale F., Flematti G., Sivasithamparam K., Lorito M., Marra R., Skelton B.W., Ghisalberti E.L. Harzianic acid, an antifungal and plant growth promoting metabolite from *Trichoderma harzianum* // *Journal of Natural Products*. 2009. V. 72. No. 11. P. 2032–2035. doi: 10.1021/np900548p
64. Tamandegani P.R., Marik T., Zafari D., Balázs D., Vágvölgyi C., Szekeres A., Kredics L. Changes in peptaibol production of *Trichoderma* species during *in vitro* antagonistic interactions with fungal plant pathogens // *Biomolecules*. 2020. V. 10. No. 5. Article No. 730. doi: 10.3390/biom10050730
65. Álvarez-García S., Mayo-Prieto S., Carro-Huerta G., Rodríguez-González Á., González-López Ó., Gutiérrez S., Casquero P.A. Volatile organic compound chamber: a novel technology for microbiological volatile interaction assays // *Journal of Fungi (Basel)*. 2021. V. 7. No. 4. Article No. 248. doi: 10.3390/jof7040248

Продукты трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов в пищевой продукции и продовольственном сырье (аналитический обзор)

© 2022. Л. К. Киш¹, к. в. н., директор,
А. В. Третьяков¹, к. х. н., доцент, зав. отделением,
О. И. Лаврухина^{1,2}, к. х. н., главный специалист,
В. Г. Амелин^{1,2}, д. х. н., профессор, М. А. Гергель¹, зам. директора,
Н. В. Мищенко², д. б. н., профессор,

¹Всероссийский государственный Центр качества
и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов,
123022, Россия, г. Москва, Звенигородское шоссе, д. 5,

²Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600026, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,
e-mail: hamsster@mail.ru

Вопрос идентификации, определения и нормирования продуктов трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов, попадающих в пищу в результате производственных процессов, остаётся открытым. В перечни нормируемых загрязнителей включаются далеко не все возможные метаболиты в связи с отсутствием утверждённых методик их определения или же в принципе какой-либо информации о них (об их структуре, токсичности, потенциальной опасности для здоровья потребителя). Продукты трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов, содержащиеся в пищевой продукции и продовольственном сырье как растительного, так и животного происхождения, могут представлять собой опасность для живых организмов не меньшую, чем исходные соединения, а в некоторых случаях и большую. Использование неполной или ошибочной информации об особенностях трансформации загрязнителей и их накоплении в продовольственном сырье и продуктах питания представляет собой дополнительный риск в сфере пищевой безопасности. Их идентификация и определение остаётся актуальной проблемой, для решения которой необходима разработка и внедрение в лабораторную практику современных эффективных аналитических процедур и методических подходов. В данной работе представлен анализ литературных источников и сведений, имеющихся в научных базах данных, о наиболее изученных на сегодняшний день продуктах трансформации 18 пестицидов и 13 антибактериальных препаратов, используемых в сельскохозяйственной практике, включая незарегистрированные или запрещённые для применения на территории Российской Федерации, а также предварительные результаты ретроспективного анализа проб животноводческой продукции, полученные при проведении в 2020 г. Всероссийским государственным Центром качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов работ по оценке риска в рамках государственного мониторинга безопасности пищевой продукции и продовольственного сырья.

Ключевые слова: метаболиты пестицидов и антибиотиков, контроль, продукция животноводства, нормирование.

Transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and raw materials (analytical review)

© 2022. L. K. Kish¹ ORCID: 0000-0002-3814-7134, A. V. Tretyakov¹ ORCID: 0000-0002-4984-9502,
O. I. Lavrukchina^{1,2} ORCID: 0000-0001-6248-5726, V. G. Amelin^{1,2} ORCID: 0000-0001-7477-7398,
M. A. Gergel¹ ORCID: 0000-0002-8033-1154, N. V. Mishchenko² ORCID: 0000-0002-3643-3129

¹The Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality,
5, Zvenigorodskoye Shosse, Moscow, Russia, 123022,

²Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov,
87, Gor'kogo St., Vladimir, Russia, 600026,
e-mail: hamsster@mail.ru

The problem of identification, determination and regulation of transformation products of pesticides and veterinary drugs that transfer into food as a result of production processes remains open. Not all possible metabolites are included in the lists of regulated pollutants because of the unavailability of approved methods for their determination or any informa-

tion about them in principle (about their structure, toxicity, potential danger for consumer health). The transformation products of pesticides and veterinary drugs, particularly antibiotics, contained in food and raw materials of both plant and animal origin may generate a danger for live organisms no less than the parent compounds, and even greater in some cases. Using incomplete or incorrect information about the specificity of the pollutants' transformation and accumulation in food and raw materials represents an additional risk in food safety.

Their identification and determination still are an actual problem, which requires the development and introduction into laboratory practice of new effective analytical procedures and knowledge-intensive methodological approaches. This paper presents an analysis of publications and information available in scientific databases on the most studied transformation products of 18 pesticides and 13 veterinary drugs used in agricultural practice, including substances that are not registered or prohibited for use in the Russian Federation. In addition, preliminary results of a retrospective analysis of samples of livestock products obtained during the risk assessment by the Federal State Budgetary Institution "All-Russian State Center for Animal Feed and Drug Standardization and Quality" in 2020 as a part of state monitoring of food and food raw materials safety are presented.

Keywords: metabolites of pesticides and antibiotics, control, livestock production, regulatory documentation.

Перечень нормируемых в продуктах питания и продовольственном сырье загрязнителей обширен. В зависимости от вида продукции, он включает в себя токсичные элементы, пестициды, антибиотики, полициклические ароматические углеводороды, полихлорированные бифенилы (ПХБ), диоксины, нитрозамины, природные токсины (зоо-, фито- и микотоксины, токсины бактериального происхождения, биогенные амины), нитраты и т. д. На территории Российской Федерации (РФ) и Евразийского экономического союза (ЕАЭС) основными документами, регулирующими качество и безопасность пищевой продукции, являются Технические регламенты Таможенного союза (ТР ТС): 021/2011 – «О безопасности пищевой продукции»; 033/2013 – «О безопасности молока и молочной продукции»; 034/2013 – «О безопасности мяса и мясной продукции»; 015/2011 – «О безопасности зерна»; 040/2016 – «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Сырьё животного происхождения не должно содержать эстрогенных гормонов, гормональных веществ, тиреостатических препаратов, антибиотиков и других лекарственных средств ветеринарного назначения. Кроме того, постановлением от 28 января 2021 г. утверждён СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», который устанавливает в продукции максимально допустимые уровни (МДУ), в том числе временные (ВМДУ), 627 пестицидов. Данный перечень расширен, предыдущий документ (ГН 1.2.3539-18 «Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень)») нормировал содержание 603 действующих веществ пестицидов.

На территории Европейского Союза (ЕС), включающего на данный момент 27 стран, действует Регламент № 178/2002, который

устанавливает общие принципы и требования пищевого законодательства. Кроме того, Кодекс Алиментариус («Пищевой Кодекс» – свод пищевых международных стандартов, принятых Международной комиссией ФАО/ВОЗ) регулирует маркировку пищи, пищевые добавки, предельные уровни её загрязнения, МДУ пестицидов и антибактериальных препаратов, применяемых в ветеринарии, методики оценки биотехнологических рисков, гигиену в пищевом производстве, методы анализа и отбора образцов.

Согласно нормативной документации как РФ, так и зарубежных стран для некоторых загрязнителей, таких как дихлордифенилтрихлорметилметан (ДДТ), гексахлорциклопексан (ГХЦГ), 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота, антибиотики тетрациклиновой группы, МДУ устанавливаются для суммы основного исходного соединения и/или его метаболитов, изомеров, производных солей, эфиров, так как в процессе трансформации исходное вещество может полностью разложиться, а сопутствующие вторичные загрязнители сохраняются [1].

В настоящее время исследования пищевой продукции и сырья на соответствие требованиям ТР ТС в случае декларирования возможно лишь методами, входящими в перечень «стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований конкретного регламента. Идентификация и определение в пищевой продукции и продовольственном сырье продуктов трансформации пестицидов и антибактериальных препаратов остаётся нерешённой задачей в связи с отсутствием регламентирующих документов и современных аналитических методик. Проработаны методы контроля зарегистрированных на национальном уровне наиболее часто используемых, а также запрещённых в ветеринарной

и агротехнической практиках препаратов и пестицидов. Для их определения в продуктах питания чаще всего используют и совершенствуют такие методы, как высокоэффективная (ВЭЖХ), ультравысокоэффективная жидкостная и газовая хроматография (ГХ) с применением масс-спектрометрических детекторов различных классов (МСⁿ, время-пролётные, квадрупольные, Orbitrap и др.). Предложены методики, позволяющие с высокой чувствительностью определять в рамках одного анализа остаточные содержания до 200 лекарственных препаратов, используемых в ветеринарии, и более 450 пестицидов [2], но они не имеют на данный момент необходимого нормативного статуса для использования в рамках официального контроля. Кроме того, если на данный момент перечень запрещённых в Бразилии пестицидов содержит 81 соединение, то в Германии – 60, в Китае – 47, в РФ – 20, в Аргентине – 18, в Армении – 12, а в Боливии – лишь 5 [3].

Всё большее значение приобретают методики «нецелевого поиска», называемые также ретроспективным анализом, позволяющие проводить широкомасштабный скрининг большого спектра соединений после целевого ВЭЖХ-МС исследования проб [1]. Нецелевой поиск подразумевает количественную оценку известных аналитов с использованием стандартов и идентификацию ранее не выявленных, неожиданных, неизвестных соединений в рамках одного анализа. Основные параметры (они же и ограничения) аналитических методик в данном случае: разработка и использование общей процедуры извлечения, эффективное разделение в процессе хроматографирования и высокая разрешающая способность детектора, совмещённая при этом с возможностью работы в режиме получения полного спектра, что достигается использованием времяпролётного детектора (Time-Of-Flight, TOF) или ионной ловушки (Ion Trap, IT). Orbitrap масс-спектрометры (сочетающие ВЭЖХ и ГХ с линейной ионной ловушкой) в данном случае максимально эффективны как для полного МС-сканирования [4, 5], так и при идентификации соединений и подтверждении подлинности в режимах МС/МС и МС/МС/МС [4]. Это позволяет проводить не только целевой поиск загрязнителей в сложных матрицах, но и ретроспективный анализ продуктов их трансформации [6]. Дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция является наиболее подходящей процедурой пробоподготовки, давая возможность одновре-

менного селективного хроматографического определения множества компонентов пробы, включая пестициды и антибиотики в пищевой продукции и продовольственном сырье как растительного, так и животного происхождения [2].

Объекты и методы исследования

Обзор охватывает литературные сведения 1983–2021 гг. Поиск проведён в российских и иностранных базах данных Elibrary, Science Direct, PubMed, Global Pesticide Bans, а также при помощи поисковой системы Яндекс по ключевым словам: «пестициды», «ветеринарные препараты», «метаболиты пестицидов», «метаболиты антибиотиков». Проанализированы результаты анализа проб животноводческой продукции, полученные ФГБУ «ВГНКИ» при проведении в 2020 г. работ по оценке риска в рамках государственного мониторинга безопасности пищевой продукции и продовольственного сырья. Информация сопоставлена с действующим законодательством РФ и ЕАЭС, ЕС, США, Австралии, Бразилии и систематизирована в соответствии с разделами статьи.

Пестициды, антибактериальные препараты, продукты их трансформации и нормирование содержания в продовольственном сырье

В мясе потенциально может содержаться большое количество различных ксенобиотиков: загрязнители воды и корма, в том числе токсичные элементы и пестициды; токсиканты, попадающие в окружающую среду (ОС) в результате техногенных аварий или при несоблюдении режимов хранения и утилизации отходов, такие как диоксины и ПХБ, лекарственные препараты, используемые для лечения и профилактики болезней животных. Продукты животного происхождения могут представлять собой источник ксенобиотиков с высокой способностью к биоаккумуляции, которые медленно разлагаются до менее токсичной формы. Кроме того, они могут содержать метаболиты, продукты деградации/трансформации ксенобиотиков, пестицидов и лекарственных средств для ветеринарного применения. Продукты трансформации основных загрязнителей пищевой продукции и сырья могут обладать равной и большей токсичностью, чем исходные соединения, как, например, в случае хлорорганических

пестицидов гептахлора и альдрина, фосфор-органического пестицида афоса (1-ацетокси-2,2,2-трихлорэтил-о,о-дифенилфосфонат) [7] и карбамата карбосульфана, метаболизирующегося до карбофурана.

При проведении Роспотребнадзором в 2020 г. мониторинговых исследований по идентификации пестицидов в пищевой продукции в 0,15% образцов плодоовощной продукции наряду с нормируемыми пестицидами (ДДТ, его основными метаболитами дихлордифенилдихлорэтаном (ДДД) и дихлордифенилдихлорэтиленом (ДДЕ), γ -ГХЦГ) выявлены незаявленные пестициды (крезоксим-метил, малатион, металаксил, перметрин, пиридабен, пириметанил, пиримифос-метил, процимидон, триадимефон, фенвалерат I, II, фозалон, фталид, хлорпирифос, цигалотрин, циперметрин I, II, III, IV) [8].

Используя ретроспективный анализ, были проанализированы образцы мёда, мяса, кормов, сои, маточного молочка, гинкго [4]. В образцах корма и мёда были идентифицированы 3,5,6-трихлор-2-пиридиол и ангидроэритромицин соответственно. На основе полученных результатов и литературных данных составлен перечень возможных продуктов трансформации некоторых пестицидов и антибактериальных препаратов в пищевой продукции растительного и животного происхождения. Использование масс-спектрометрии позволяет определять исходные соединения, продукты их трансформации, а также выяснять структуру неизвестных соединений [1, 6].

Азоксистробин – малотоксичный для пчёл и шмелей фунгицид из класса стробилуринов [9]. Основной метаболит – азоксистробиновая кислота, обладает высокой токсичностью для водных организмов [10]. Содержание азоксистробина в объектах ОС, а также пищевой продукции регламентируется ТР ТС 015/2011 и СанПиН 1.2.3685-21. В зерне хлебных злаков МДУ составляет 0,3 мг/кг, а содержание азоксистробиновой кислоты не регламентируется ни ТР, ни СанПиН.

Алахлор является хлорацетамидом, запрещён к применению в 95 странах, в том числе с 2006 г. в странах ЕС [3, 11], но является одним из наиболее широко используемых гербицидов первого поколения в США. Основной метаболит алахлора, сохраняющийся в пищевой продукции, – 2,6-диэтиланилин [1], способный к биоконцентрации в водных организмах [10].

Ацетамиприд (моспилан, NI-25) относится к классу неоникотиноидов, используется

в основном для протравливания семян, МДУ в плодовых (семечковых) – 0,8 мг/кг (СанПиН 1.2.3685-21). Согласно литературным данным, в процессе его трансформации возможно образование одиннадцати метаболитов (девять из них – растительные) менее токсичных, чем исходное соединение [12].

Бендиокарб относится к карбаматам, метаболизируется путём расщепления сложноэфирной группы карбамата с образованием фенола, который, согласно лабораторным исследованиям фармакокинетики [10], выводится в виде сульфатных и глюкуроновых конъюгатов, однако способен концентрироваться в почве и, как показывают исследования, обнаруживается в пищевой продукции [1].

Гексахлорциклогексан (ГХЦГ) – хлороорганический пестицид (ХОП), настоящее время запрещён к применению в 135 странах, включая РФ. В пищевой продукции и сырье растительного и животного происхождения нормируется содержание его α -, β - и γ -изомеров и их суммы (СанПиН 1.2.3685-21 и ТР ТС 015/2011). γ -ГХЦГ (линдан) метаболизируется в человеческом организме до моно-, ди-, три-, тетрахлорфенолов и до дигидрохлорбензолов неизвестной конфигурации [13]. Метаболиты α -изомера ГХЦГ в живых организмах также включают в себя трихлорфенолы, в результате негативного влияния которых отмечено повышение уровня риска нарушения поведения детей (синдром дефицита внимания и гиперактивность) [14].

Глифосат – неселективный гербицид, который относится к фосфорорганическим соединениям. Многие генно-модифицированные культуры (ГМ-культуры) устойчивы к глифосату. Кроме того, несмотря на быстрое разложение в ОС, сам пестицид и его основной метаболит – аминометилфосфоновая кислота (АМФК) способны накапливаться в растительном сырье для производства кормов, с кормом «переноситься» в органы и ткани сельскохозяйственных животных и далее к человеку [15]. Ещё один метаболит глифосата – саркозин, в основном был обнаружен в экспериментах с чистой культурой, что может быть обусловлено его более быстрой деградацией по сравнению с АМФК [16]. Саркозин является производным аминокислоты и естественным образом содержится в мышцах и других тканях организма. Глиоксиловая кислота (также продукт деградации глифосата) – компонент многих метаболических процессов. В связи с этим ни саркозин, ни глиоксиловая кислота

не могут использоваться в качестве маркеров глифосата.

Глифосат – вещество «потенциально канцерогенное для человека» [17]. СанПиН 1.2.3685-21 установлен ВМДУ для импортируемой продукции на уровне (мг/кг): 5,0 в субпродуктах млекопитающих; 0,05 в молоке, яйцах, мясе птицы и мясе млекопитающих; 0,5 в субпродуктах свинных и птицы; согласно ТР ТС 015/2011 МДУ глифосата (мг/кг) в сельскохозяйственной продукции, в том числе в кукурузе не более 0,3, в сое не более 0,15. Для аминотетрагидропиримидинового глифосата МДУ в продукции растительного и животного происхождения не установлены.

Дихлордифенилтрихлорметилметан (ДДТ, дуст) является ХОП, запрещён к использованию Стокгольмской конвенцией о стойких органических загрязнителях. Основные его метаболиты: ДДД и ДДЕ. Исследования канцерогенных свойств ДДТ и его метаболитов не завершены, однако его продолжают использовать в борьбе с переносчиками инфекционных заболеваний, когда нет альтернативных средств, как в случае с распространением малярии в странах Африки и Азиатско-Тихоокеанского региона [18]. При этом основным путём попадания ДДТ и его метаболитов в организм является потребление загрязнённых им продуктов питания, а для некоторых образцов пищевой продукции концентрации ДДД и ДДЕ в сумме значительно превышают содержание ДДТ, указывая на трансформацию исходного соединения с дальнейшим накоплением его метаболитов [19].

Имидаклоприд относится к классу неоникотиноидов. В России его использование разрешено, ТР ТС 015/2011 нормируется остаточное содержание в кукурузе, зерне, рапсе и подсолнечнике. Он широко использовался и за рубежом, однако в 2018 г. агентство Reuters анонсировало запрет на его использование в странах ЕС ввиду высокой токсичности для пчёл [20]. Из метаболитов в пищевой продукции идентифицированы олефин имидаклоприда, 6-хлороникотиновая кислота, нитрогуанидин, мочевины [1].

Карбендазим – фунгицид, метаболит беномила, оба соединения являются производными бензимидазола и разрешены к использованию на территории РФ. Их содержание в пищевой продукции регламентируется СанПиН 1.2.3685-21. В живых организмах он быстро метаболизируется до 5-гидрокси-2-бензимидазолкарбамата и 2-аминобензимидазола [21]. Однако, как отмечено в работе [1],

основной продукт трансформации карбендазима, обнаруживаемый в пищевой продукции – диметил-4,4-(о-фенилен)бисаллофанат.

Карбосульфат – карбамат, обладающий относительно невысокой токсичностью, однако в процессе его трансформации образуется несколько метаболитов, среди которых – **карбофуран** [22], превышающий по токсичности исходное соединение и запрещённый к использованию во многих странах.

Крезоксим-метил – фунгицид класса стробилуринов, малотоксичен для пчёл, теплокровных и человека, разрешён к использованию в ЕС, Англии, США, Австралии и РФ. В почве обнаружен метаболит BF 490-1, токсичность которого не до конца изучена [23]. Однако в растительной пищевой продукции идентифицированы другие метаболиты: BF 490-2 и BF 490-9 [2, 24].

Метамитрон – широко используемый гербицид, относящийся к триазинонам. Основной метаболит, присутствующий в почве, – дезамино-метамитрон [24]. Известны ещё порядка десяти его метаболитов, в продуктах питания обнаружена бензоилформиевая кислота [1].

Паклобутразол – триазольный фунгицид, разрешён в странах ЕС и Австралии. В продуктах питания идентифицированы два его метаболита: CGA149907 и NOA457654, являющихся потенциальными загрязнителями подземных вод [1]. В странах ЕС с 13.08.2019 согласно Регламенту (ЕС) 2019/89 утверждён МДУ паклобутразола (суммы изомеров) 0,01 мг/кг для большинства видов растительной и животноводческой продукции. В РФ паклобутразол не нормируется в пищевой продукции (СанПиН 1.2.3685-21).

Пропахлор относится к классу хлорацетамидов, используется в качестве гербицида, мало опасен для человека [25]. Основные метаболиты в пищевой продукции: пропахлороксаниловая кислота, пропахлорсульфинилуксусная кислота, пропахлорсульфоновая кислота, N-хлорацетиланилин, N-изопропиланилин, анилин. Остатки метаболитов пропахлора обнаружены в курином яйце [25]. Анилин и его производные представляют серьёзную угрозу для объектов ОС, токсичны для растений и водных объектов [26].

Фенбуконазол – триазольный фунгицид, исследование токсичности которого ещё продолжается [27]. В процессе его трансформации образуются два лактона (диастереомера): RH-9129 и RH-9130, обнаруживаемые в растительной пищевой продукции и почве [1, 27].

Хлорпирифос – один из наиболее стойких фосфорорганических пестицидов. Он включён в «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешённых к применению на территории Российской Федерации» (по состоянию на 27.01.2022), СанПиН 1.2.3685-21 регламентируется не только его остаточное содержание, но и хлорпирифос-метила. Основной метаболит хлорпирифоса, определяемый в пищевой продукции – 3,5,6-трихлоро-2-пиридиол [1].

Этофенпрокс (требон) – пиретроидный инсектицид, МДУ (мг/кг) в картофеле – 0,1, в плодовых семечковых – 1,0 (СанПиН 1.2.3685-21). Известно порядка 14 его метаболитов [23], при исследовании пищевой продукции обнаружена 3-феноксibenзойная кислота [1].

Этридиазол является триадиазолом. Используется в качестве почвенного фунгицида. На территории ЕС его остаточное содержание нормируется и в растительной, и в животноводческой продукции Regulation (EU) 2017/1777. Российским законодательством не регламентируется. Известны два его метаболита: 5-этокси-1,2,4-триадиазол-3-карбоновая кислота (ЕТ-СА) и N-ацетил-S-(5-этокси-1,2,4-триадиазол-3-ил-метил)-1-цистеин (ЕТ-МА) [2, 37]. ЕТ-СА предложен в качестве возможного биомаркера для биологического мониторинга этридиазола [28], оба метаболита определяются в продуктах питания.

Авиламицин – антибиотик, относящийся к классу ортозомицинов, ингибирует рост грамположительных бактерий, и, кроме того, широко использовался в птицеводстве в качестве стимулятора роста [28]. Авиламицин очень быстро метаболизируется, основной метаболит в организме животных – дихлороизоэвериновая кислота [30]. ТР ТС 034/2013 нормирует содержание авиламицина (дихлороизоэвериновой кислоты) в мясе, жире, сыре, печени и почках только для свиней и кроликов: 0,05; 0,1; 0,3 и 0,2 мг/кг соответственно.

Нитрофураны – группа веществ, содержащих фурановое кольцо с нитрогруппой, большая часть которых не относится к антибиотикам. Они обладают широким спектром активности, включающим бактерии, вирусы, простейшие [31]. Нитрофураны и их метаболиты обладают мутагенными и канцерогенными свойствами и в настоящее время запрещены к использованию во многих странах, в том числе в ЕС, США, Австралии, Бразилии и РФ. В ветеринарии наиболее часто исполь-

зовались и вопреки запретам продолжают использоваться **фуразолидон**, **фуралтадон**, **нитрофурантоин** (фурадонин) и **нитрофуралин** (фурацилин) [32, 33]. Проблема обнаружения остаточных содержаний нитрофуранов в продуктах питания связана с очень быстрой метаболизацией в результате высокой светочувствительности, поэтому их содержание оценивается по метаболитам. В организме животных нитрофураны быстро распадаются, однако образующиеся при этом метаболиты сохраняются в тканях достаточно долго.

Нитроимидазолы обладают широким спектром активности в отношении анаэробных грамположительных, грамотрицательных бактерий, паразитов, микобактерий и используются в медицине и ветеринарии [34]. Остаточные содержания метронидазола, диметридазола, ронидазола, дапсона, клотримазола, аминитризола в соответствии с ТР ТС 034/2013 не допускаются в продукции животного происхождения на уровне определения методов (< 0,1 мг/кг), для них характерны генотоксичность и канцерогенность [35]. Для контроля незаконного применения нитроимидазолов разработаны чувствительные методики определения не только исходных веществ, но и их метаболитов в пищевой продукции и продовольственном сырье [36].

Тетрациклин и его группа – наиболее широко применяемые в животноводстве антибиотики. В процессе трансформации тетрациклина могут образовываться более токсичные 4-эпитетрациклин, ангидротетрациклин и 4-эпиангидротетрациклин [37]. Метаболиты окситетрациклина, тетрациклина, хлортетрациклина обнаружены в яичном белке и плазме при изучении их распределения, связанного с кормлением птицы с использованием антибиотиков [38]. В яичном белке из продуктов трансформации в значительных концентрациях были обнаружены только окситетрациклин, тетрациклин, изохлортетрациклин и их 4-эпимеры. Европейским (Commission Regulation (EU) 37/2010) и Российским законодательством (ТР ТС 021/2011) установлены МДУ тетрациклина, хлортетрациклина и окситетрациклина с учётом суммы содержания исходного соединения и его 4-эпимеров.

Эритромицин относится к классу макролидных антибиотиков, регулярно используется в ветеринарной практике. Как и у людей, у животных могут развиваться гиперчувствительные реакции на эритромицин, но, несмотря на это, в настоящее время для человека макролиды

Пестициды, антибактериальные препараты и продукты их трансформации, определяемые в пищевой продукции и сырье / Pesticides, antibacterial drugs and their transformation products in food and raw materials

Исходное соединение Parent compound	Продукты трансформации Transformation product	Литература References
Авиламицин Avilamycin	Дихлороизоэверниновая кислота / Dichloroisoevernic acid	[30]
Ацетамиприд Acetamiprid	(Е)-N ² -карбамоил-N ¹ -[(6-хлор-3-пиридил)метил]-N ¹ -метилацетамидин (IM-1-2) / N ² -carbamoyl-N ¹ -[(6-chloro-3-pyridyl)methyl]-N ¹ -methylacetamidine Ацетамиприд-десметил (IM-2-1) / N ¹ -[(6-chloro-3-pyridyl)methyl]-N ² -cyanoacetamidine	[2, 50]
Алахлор Alachlor	2,6-диэтиланилин (2,6-ДЭА) 2,6-diethylaniline (2,6-DEA)	[1]
Азоксистробин Azoxystrobin	Азоксистробиновая кислота Azoxystrobin acid	[1]
Бендиокарб Bendiocarb	2,2-диметил-1,3-бензодиоксол-4-ол 2,2-dimethyl-1,3-benzodioxol-4-ol	[1, 10]
Глифосат Glyphosate	Аминометилфосфоновая кислота (АМФК) Aminomethylphosphonic acid (AMPA)	[15]
ГХЦГ НСН	Моно-, ди-, три- и тетрахлорфенолы и дигидроксихлорбензолы неизвестной конфигурации* Mono-, di-, tri- and tetrachlorophenols and dihydroxychlorobenzenes of unknown configuration*	[13]
ДДТ DDT	Дихлордифенилдихлорэтан (ДДД) Dichlorodiphenyldichloroethane (DDD) Дихлордифенилдихлорэтилен (ДДЕ) Dichlorodiphenyldichloroethylene (DDE)	[19]
Диметридазол Dimetridazole	2-гидроксиметил-1-метил-5-нитроимидазол (ГММНИ) 2-hydroxymethyl-1-methyl-5-nitroimidazole (HMMNI)	[36]
Имидаклоприд Imidacloprid	Олефин / Olefine 6-хлороникотиновая кислота / 6-chloronicotinic acid Нитрогуанидин / Nitroguanidine Мочевина / Urea	[1]
Ипронидазол Ipronidazole	1-метил-2-(2'-гидроксиизопропил)-5-нитроимидазол (гидрокси-ипронидазол, IPZОН) 1-methyl-2-(2'-hydroxyisopropyl)-5-nitroimidazole (hydroxyipronidazole, IPZОН)	[36]
Карбендазим Carbendazim	Диметил-4,4'-(о-фенилен)бисаллофанат (FH-432) Dimethyl-4,4'-(o-phenylene)bisallophanate (FH-432)	[1]
Карбосульфан Carbosulfan	Карбосульфан сульфамид / Carbosulfan sulfinamide Карбофуран / Carbofuran 3-гидроксикарбофуран / 3-hydroxycarbofuran 3-кетикарбофуран / 3-ketocarbofuran 3-гидрокси-7-фенолкарбофуран / 3-hydroxy-7-phenolcarbofuran 3-кето-7-фенолкарбофуран / 3-keto-7-phenolcarbofuran 7-фенолкарбофуран / 7-phenolcarbofuran	[1]
Крезоксим-метил Kresoxim-methyl	BF 490-2, BF 490-9	[1]
Метамитрон Metamitron	Бензоилформиновая кислота Benzoylformic acid	[1]
Метронидазол Metronidazole	1-(2-гидроксиэтил)-2-гидроксиметил-5-нитроимидазол (гидроксиметронидазол, MNZОН) 1-(2-hydroxyethyl)-2-hydroxymethyl-5-nitroimidazole (hydroxymetronidazole, MNZОН)	[36]

Исходное соединение Parent compound	Продукты трансформации Transformation product	Литература References
Нитрофуразон Nitrofurazone	Семикарбазид (СЕМ) Semicarbazide (SEM)	[31]
Нитрофурантоин Nitrofurantoin	1-амино-гидантоин (АГД) 1-aminohydantoin (AHD)	[31]
Окситетрациклин Oxytetracycline	4-эпиокситетрациклин / 4-epioxytetracycline N-деметилокситетрациклин / N-demethyloxytetracycline	[38]
Паклобутразол Paclobutrazol	CGA149907, NOA457654	[1]
Пропахлор Propachlor	Пропахлороксаниловая кислота (CP-118700) Propachlor oxanilic acid (CP-118700) Пропахлорсульфинилуксусная кислота (CP147935) Propachlor sulfinylacetic acid (CP147935) Пропахлорсульфоновая кислота (CP118702) Propachlor sulfonic acid (CP118702) N-хлорацетиланилин / N-chloro-acetyl-aniline N-изопропиланилин / N-isopropyl-aniline Анилин / Aniline	[1, 25]
Ронидазол Ronidazole	2-гидроксиметил-1-метил-5-нитроимидазол (ГММНИ) 2-hydroxymethyl-1-methyl-5-nitroimidazole (HMMNI)	[36]
Тетрациклин Tetracycline	4-эпитетрациклин / 4-epitetracycline N-деметилтетрациклин / N-demethyltetracycline	[38]
Фенбуконазол Fenbucnazole	RH-9129, RH-9130	[1]
Фуразолидон Furazolidone	3-амино-2-оксазолидинон (АОЗ) 3-amino-2-oxazolidinone (AOZ)	[31]
Фуралтадон Furaltadone	5-метилморфолино-3-амино-2-оксазолидинон (АМОЗ) 3-amino-5-morpholino-methyl-1,3-oxazolidinone (AMOZ)	[31]
Хлорпирифос Chlorpyrifos	3,5,6-трихлоро-2-пиридинол 3,5,6-trichloro-2-pyridinol	[1]
Хлортетрациклин Chlortetracycline	4-эпихлортетрациклин / 4-epichlortetracycline Изохлортетрациклин / Isochlortetracycline 4-эпиизохлортетрациклин / 4-epiisochlortetracycline N-деметилизохлортетрациклин N-demethylisochlortetracycline	[38]
Эритромицин Erythromycin	Ангидроэритромицин Anhydroerythromycin	[1]
Этофенпрок Etofenprox	3-феноксibenзойная кислота (3-РВА) 3-phenoxybenzoic acid (3-PBA)	[1]
Этридазол Etridiazole	5-этокси-1,2,4-тридазол-3-карбоновая кислота (ЕТ-СА) 5-ethoxy-1,2,4-thiadiazole-3-carboxylic acid (ET-CA) N-ацетил-S-(5-этокси-1,2,4-тридазол-3-ил-метил)-L-цистеин (ЕТ-МА) N-acetyl-S-(5-ethoxy-1,2,4-thiadiazol-3-yl-methyl)-l-cysteine (ET-MA)	[1]

Примечание: * – метаболиты γ -ГХЦГ в человеческом организме.
Note: * – γ -HCH metabolites in human body.

наиболее безопасны [39]. Его метаболит – ангидроэритромицин не обладает антимикробной активностью, при этом обнаруживается в продуктах питания [1], данные о токсичности в настоящее время не представлены в научной и справочной литературе. Максимально

допустимый уровень эритромицина в мясе, печени, почках и жире для всех видов продуктивных животных согласно ТР ТС 034/2013 – 0,2 мг/кг.

По данным лабораторных исследований ФГБУ «ВГНКИ», проводимых в 2020 г.

в рамках мониторинга ветеринарной безопасности осуществляемого Россельхознадзором, выявлены превышения содержания глифосата в сое, поставляемой на пищевые цели, кроме того, обнаружена не нормируемая в пищевой продукции АМФК, остаточные содержания запрещённых в ветеринарной практике антибактериальных препаратов и их метаболитов: метронидазол, гидроксиметронидазол, гидроксиметилметронидазол, 3-амино-2-оксазолидинон (АОЗ), семикарбазид (СЕМ).

В таблице представлены обобщённые сведения о рассмотренных в работе пестицидах, антибактериальных препаратах и продуктах их трансформации в пищевой продукции и сырье, согласно анализу литературных данных и предварительным исследованиям ФГБУ «ВГНКИ» по оценке риска в рамках мониторинга безопасности пищевой продукции и продовольственного сырья.

Заключение

Большинство рассмотренных в работе пестицидов и антибактериальных препаратов регламентируются Российским законодательством. Некоторые из них, например, алахлор, бендиокарб, ГХЦГ, ДДТ, карбосульфат, паклобутразол, пропахлор, фенбуконазол, этофенпрокс, этридиназол не включены в «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешённых к применению на территории Российской Федерации», но несмотря на это обнаруживаются в продуктах питания и продовольственном сырье согласно литературным данным и в рамках проводимого на территории РФ пищевого мониторинга. Определение остаточного содержания их основных метаболитов, как в качестве биомаркеров, так и для оценки риска пищевой безопасности, в настоящее время является нерешённой задачей, в связи с отсутствием нормативно-технической базы – в первую очередь эффективных стандартизованных аналитических процедур и методических подходов. Используя официальные справочные базы данных, научную литературу о метаболизме пестицидов и антибактериальных препаратов, можно составить перечень предполагаемых метаболитов и продуктов трансформации в пищевой продукции и продовольственном сырье, а ретроспективный анализ позволит не только обнаружить потенциально опасные, не идентифицированные в рамках целевого анализа контаминанты, но и установить структуру

ранее не изученных соединений. Это даст возможность усовершенствовать стратегию пищевого мониторинга и, наряду с проведением рутинных исследований, идентифицировать в рамках оценки риска дополнительные угрозы здоровью потребителя.

References

1. Gómez-Pérez M.L., Romero-González R., Martínez-Vidal J.L., Frenich A.G. Identification of transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and related matrices: Use of retrospective analysis // *Journal of Chromatography A*. 2015. V. 1389. P. 133–138. doi: 10.1016/j.chroma.2015.02.052
2. Amelin V.G., Lavrukhina O.I. Food safety assurance using methods of chemical analysis // *Journal of Analytical Chemistry*. 2017. V. 72. P. 1–46. doi: 10.1134/S1061934817010038
3. Global Pesticide Bans: interactive map [Internet resource] <https://www.pesticideinfo.org/pesticide-maps/global-ban> (Accessed: 22.01.2022).
4. Del Mar Gómez-Ramos M., Rajski L., Heinzen H., Fernández-Alba A.R. Liquid chromatography Orbitrap mass spectrometry with simultaneous full scan and tandem MS/MS for highly selective pesticide residue analysis // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015. V. 407. No. 21. P. 6317–6326. doi: 10.1007/s00216-015-8709-z
5. Wang J., Chow W., Wong J.W., Leung D., Chang J., Li M. Non-target data acquisition for target analysis (nDATA) of 845 pesticide residues in fruits and vegetables using UHPLC/ESI Q-Orbitrap // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2019. V. 411. P. 1421–1431. doi: 10.1007/s00216-019-01581-z
6. Romero-González R., Frenich A. Application of HRMS in pesticide residue analysis in food from animal origin // *Applications in High Resolution Mass Spectrometry*. Elsevier, 2017. P. 203–232. doi: 10.1016/B978-0-12-809464-8.00007-5
7. Fedorov L.A., Yablokov A.V. Pesticides – a toxic blow to the biosphere and man. Moskva: Nauka, 1999. 461 p. (in Russian).
8. On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2020: State Report. Moskva: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2021. 256 p. (in Russian).
9. Zinchenko V.A. Chemical plant protection: means, technology and environmental safety. Moskva: KolosS, 2012. 127 p. (in Russian).
10. PubChem: open chemistry database [Internet resource] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov> (Accessed: 21.01.2022).
11. Tirmenstein M.A., Mangipudy R. Alachlor / Ed. P. Wexler // *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*. Academic Press, 2014. P. 107–109. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00225-6

12. Report of the Joint Meeting of the FAO Panel of Experts on Pesticide Residues in Food and the Environment and the WHO Core Assessment Group on Pesticide Residues Geneva, Switzerland, 20–29 September 2014. FAO, 2014. 522 p.
13. Angerer J., Maass R., Heinrich R. Occupational exposure to hexachlorocyclohexane. VI. Metabolism of gamma-hexachlorocyclohexane in man // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1983. V. 52. No. 1. P. 59–67. doi: 10.1007/BF00380608
14. Xu X., Nembhard W.N., Kan H., Kearney G., Zhang Z.J., Talbott E.O. Urinary trichlorophenol levels and increased risk of attention deficit hyperactivity disorder among US school-aged children // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2011. V. 68. No. 8. P. 557–561. doi: 10.1136/oem.2010.063859
15. Bai S.H., Ogbourne S.M. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. P. 18988–19001. doi: 10.1007/s11356-016-7425-3
16. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Glyphosate. 2020. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service [Internet resource] <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp214.pdf> (Accessed: 11.01.2022).
17. Guyton K.Z., Loomis D., Grosse Y., El-Ghissassi F., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Scocciati C., Mattock H., Straif K. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate // *The Lancet Oncology*. 2015. V. 16. P. 490–491. doi: 10.1016/S1470-2045(15)70134-8
18. Mirmigkou S., de Boer J. DDT and metabolites // *Dioxin and Related Compounds*. Springer, 2015. P. 355–378. doi: 10.1007/978_2015_367
19. Istomin A.V., Yeliseyev Yu.Yu., Yeliseyeva Yu.V. Conditionality of risks to health of the children's population chemical contamination of foodstuff in the region // *ZNiSO*. 2014. No. 2 (251). P. 18–21 (in Russian).
20. EU to fully ban neonicotinoid insecticides to protect bees [Internet resource] <https://www.reuters.com/article/eu-environment-bees/eu-to-fully-ban-neonicotinoid-insecticides-to-protect-bees-idUSS8N1Q100F> (Accessed: 11.01.2022).
21. Krechniak J., Kłosowska B. The fate of 14C-carbendazim in rat // *Xenobiotica*. 1986. V. 16. No. 9. P. 809–815. doi: 10.3109/00498258609038962.
22. Gupta R.C. Carbamate pesticides / Ed. P. Wexler // *Encyclopedia of Toxicology (Third edition)*. Academic Press, 2014. P. 661–664. doi: 10.1016/b978-0-12-386454-3.00106-8
23. Lewis K.A., Tzilivakis J., Warner D., Green A. An international database for pesticide risk assessments and management // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2016. V. 22. No. 4. P. 1050–1064. doi: 10.1080/10807039.2015.1133242
24. Rahman M.M., Park J.H., Abd El-Aty A.M., Choi J.H., Cho S.K., Yang A., Park K.H., Shim J.H. Analysis of kresoxim-methyl and its thermolabile metabolites in Korean plum: An application of pepper leaf matrix as a protectant for GC amenable metabolites // *Journal of Separation Science*. 2013. V. 36. No. 1. P. 203–211. doi: 10.1002/jssc.201200618
25. Gómez-Ramírez P., García-Fernández A.J. Pro-pachlor / Ed. P. Wexler // *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*. Academic Press, 2014. P. 1082–1085. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00534-0
26. Tao N., Liu G., Bai L., Tang L., Guo C. Genotoxicity and growth inhibition effects of aniline on wheat // *Chemosphere*. 2017. V. 169. P. 467–473. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.063
27. Tao Y., Zheng Z., Yu Y., Xu J., Liu X., Wu X., Dong F., Zheng Y.-Q. Supercritical fluid chromatography-tandem mass spectrometry-assisted methodology for rapid enantiomeric analysis of fenbuconazole and its chiral metabolites in fruits, vegetables, cereals, and soil // *Food Chemistry*. 2018. V. 241. P. 32–39. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.08.038
28. Van Welie R.T.H., Mensert R., Van Duyn P., Vermeulen N.P. Identification and quantitative determination of a carboxylic and a mercapturic acid metabolite of etridiazole in urine of rat and man. Potential tools for biological monitoring // *Archives of Toxicology*. 1991. V. 65. P. 625–632. doi: 10.1007/BF02098027
29. Choi J.-H., Lee K., Kim D.-W., Kil D., Kim G.-B., Cha C.-J. Influence of dietary avilamycin on ileal and cecal microbiota in broiler chickens // *Poultry Science*. 2017. V. 97. No. 3. P. 970–979. doi: 10.3382/ps/pex360
30. Ho C., Wong Y.-T. Determination of avilamycin as dichloroisoeverninic acid in poultry and porcine muscles by isotope dilution liquid chromatography–tandem mass spectrometry // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2013. V. 405. No. 26. P. 8633–8643. doi: 10.1007/s00216-013-7262-x
31. Vass M., Hruska K., Fránek M. Nitrofurantoin antibiotics: A review on the application, prohibition and residual analysis // *Veterinarni Medicina*. 2008. V. 53. P. 469–500. doi: 10.17221/1979-VETMED
32. Veach B., Anglin R., Mudalige T., Barnes P. Quantitation and confirmation of chloramphenicol, florfenicol, and nitrofurantoin metabolites in honey using LC-MS/MS // *Journal of AOAC International*. 2017. V. 101. No. 3. P. 897–903. doi: 10.5740/jaoacint.17-0262
33. Points J., Burns D., Walker M. Forensic issues in the analysis of trace nitrofurantoin veterinary residues in food of animal origin // *Food Control*. 2015. V. 50. P. 92–103. doi: 10.1016/j.foodcont.2014.08.037
34. Thomas C., Gwenin C. The role of nitroreductases in resistance to nitroimidazoles // *Biology*. 2021. V. 10. No. 5. P. 388. doi: 10.3390/biology10050388
35. Evaluation of certain veterinary drug residues in food. Thirty-fourth Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives // *World Health Organization Technical Report Series*. 1989. V. 788. P. 1–66.

36. Li X., Ke Y., Wang Y., Wang C., Ye D., Hu X., Zhou L., Xia X. Confirmatory analysis of nitroimidazoles and hydroxy metabolites in honey by dispersive-solid phase extraction and ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *Molecules*. 2018. V. 23. No. 12. Article No. 3350. doi: 10.3390/molecules23123350

37. Long S., Yang Y., Pavlostathis S.G., Xiang F., Sun P., Li N., Zhao L. Toxicity of tetracycline and its transformation products to a phosphorus removing *Shewanella* strain // *Chemosphere*. 2020. V. 246. Article No. 125681. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125681

38. Zurhelle G., Petz M., Mueller-Seitz E., Sievert E. Metabolites of oxytetracycline, tetracycline, and

chlortetracycline and their distribution in egg white, egg yolk, and hen plasma // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000. V. 48. No. 12. P. 6392–6396. doi: 10.1021/jf000141k

39. Amirov N.B., Vigel A.A. Macrolides in treatment of different bacterial infections // *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine*. 2012. V. 5. No. 4. P. 40–43 (in Russian).

40. Lewis K.A., Tzilivakis J., Warner D., Green A. An international database for pesticide risk assessments and management // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2016. V. 22. No. 4. P. 1050–1064. doi: 10.1080/10807039.2015.1133242

Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор)

© 2022. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с., Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

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

²Вятский государственный агротехнологический университет,

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

³Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

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

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Контроль запахового загрязнения (ЗЗ) воздуха представляет сложную проблему. Обычное газоаналитическое оборудование можно использовать для выявления и измерения концентрации отдельных запахообразующих веществ (ЗОВ) в воздухе, но констатировать наличие или отсутствие запаха на основании показаний соответствующих приборов практически невозможно. Это обусловлено субъективным восприятием запахов, сложным многокомпонентным составом ЗЗ, эффектами синергизма, маскировки, нейтрализации, проявляющимися при сочетанном воздействии различных ЗОВ на органы обоняния человека. В настоящее время применяется ольфактометрический метод, в котором для оценки концентрации запаха привлекается группа экспертов. Концентрация запаха, измеренная ольфактометрическим методом, выражается в единицах запаха на кубический метр (ЕЗ/м³). Результаты ольфактометрических исследований могут быть использованы для установления нормативов ЗЗ. Кроме инструментальных методов для контроля ЗЗ находят применение и методы, не требующие специального приборного оснащения. К таким методам можно отнести опросы населения, анализ жалоб на ЗЗ, а также метод гражданской науки (привлечение волонтеров к решению проблемы под руководством учёных). Опыт различных стран свидетельствует о том, что нормативные акты, направленные на контроль и минимизацию ЗЗ, могут быть установлены на региональном уровне. Такой подход позволяет максимально полно учесть социально-экономические особенности конкретных территорий и оптимизировать затраты бюджета и предприятий – источников ЗОВ на реализацию мероприятий по защите окружающей среды и населения от ЗЗ.

Ключевые слова: запаховое загрязнение, атмосферный воздух, ольфактометрия, восприятие запахов, анализ запаха, контроль запахов.

Control of odor pollution of atmospheric air (review)

© 2022. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[†]

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

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

¹Vyatka State University,

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

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Monitoring of odor pollution (OP) of air is a complex problem. Standard gas analysis equipment can be used to detect and measure the concentration of individual odor-forming substances (OFS) in the air. However, the presence or absence of odor because of instrument readings is practically impossible to prove. The reasons are the subjective perception of odors, the complex multicomponent composition of the OP, the effects of synergism, masking, neutralization, which are manifested in the combined effect of various OFS on the human olfactory system. Today olfactometric method is used to measure the concentration of odors (group of experts are used as sensors). Measured by the olfactometric method the

concentration of odor is expressed in odor of units per cubic meter (OU/m³). The most objective information about the OP can be obtained on the basis of a combined approach, including olfactometric and physicochemical research methods. The results of olfactometric research can be used to construct mathematical models of the dispersion of odors and to establish standards for OP. In addition to instrumental methods for monitoring the OP, the methods that do not require special equipment are used. There are methods of public opinion, analysis of people's complaints about OP and "Citizen Science" method (inviting volunteers to solve the problem under the guidance of scientists). Citizen Science is scientific work (collection of information, analysis of array of information, joint decision-making and so on). Citizen Science is carried out by citizens (volunteers) together with scientists or under the guidance of scientists. The experience of various countries shows that regulations aimed at control and minimization of OP can be established at the regional level. This approach will allow maximally taking into account the socio-economic characteristics of specific territories and optimizing the costs of the budget and enterprises – sources of OFS for the implementation of measures to protect the environment and the people from OP.

Keywords: odor pollution, atmospheric air, olfactometry, odor perception, odor analysis, odor control.

Разработка и внедрение эффективных систем контроля и защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения (ЗЗ) входит в число актуальных и острых проблем, которые на территории РФ не решены до настоящего времени. Сложность проблемы обусловлена особенностями соответствующего вида загрязнения. Интенсивность и характер ЗЗ практически невозможно измерить и оценить с помощью объективных методов контроля, поскольку запах как таковой представляет собой субъективное ощущение, вызываемое внешними раздражителями, воспринимаемыми органами обоняния [1]. Ощущение запаха теснейшим образом связано с эмоциональной сферой человека [2, 3]. Несмотря на то, что запах обусловлен объективными факторами – содержанием в воздухе специфических летучих веществ, реакция каждого человека на соответствующие вещества индивидуальна [4, 5]. Различная чувствительность людей к запахообразующим веществам (ЗОВ) и широкий диапазон эмоциональных реакций существенно затрудняют установление объективных гигиенических нормативов допустимого уровня ЗЗ. Ситуация осложняется тем, что ЗЗ формируется обычно не одним ЗОВ, а комплексом различных, в том числе трудно идентифицируемых веществ, присутствующих в воздухе в ничтожном, часто не поддающемся объективному контролю, количестве. О психофизиологических и нейробиологических механизмах, управляющих восприятием сложной смеси ЗОВ, до настоящего времени известно очень мало [6]. Многочисленные исследования свидетельствуют о выраженном влиянии ЗЗ на здоровье и качество жизни населения [7–9]. Под влиянием навязчивых запахов развиваются негативные стрессорные реакции, усиливается чувство незащищённости, формируется негативное восприятие действительности [10]. Люди, проживающие вблизи источников неприятных или навязчи-

вых запахов, вынуждены обращаться в контролирующие органы с жалобами на качество воздуха. Успешное разрешение возникающих конфликтных ситуаций и принятие обоснованных управленческих решений по обеспечению необходимого качества окружающей среды, возможно только на основе соответствующей законодательной и нормативной базы. Отсутствие нормативов на ЗЗ в РФ не позволяет в полной мере реализовать право граждан на благоприятную среду обитания.

Целью настоящей работы является анализ особенностей ЗЗ и методов его количественной оценки, а также выявление перспективных подходов, позволяющих снизить эмиссию ЗОВ и их неблагоприятное воздействие на население.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – особенности ЗЗ атмосферного воздуха, методы контроля и основные подходы к нормированию и регулированию ЗЗ селитебных территорий.

Для достижения поставленной цели использовали обзорно-аналитический метод. Подбор информации осуществляли по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.RU. Поиск источников осуществляли в поисковых системах Yandex и Google. В обзор методов контроля ЗЗ и подходов к его регулированию включены источники, опубликованные не позднее 2001 г.

Особенности запахового загрязнения

Принципиальным отличием ЗЗ от других видов загрязнений, является ограниченность или невозможность применения аналитических приборов для измерения концентрации и характера запаха. Ощущение запаха воз-

никает в результате субъективного восприятия органом обоняния некоторых летучих веществ. Запахи различаются по интенсивности (слабый – сильный) и характеру воздействия на человека – гедонистическому тону (приятный – безразличный – неприятный) [11]. Гедонистический тон оказывает существенное влияние на формирование психологических реакций человека. Наибольшее раздражение вызывают так называемые навязчивые запахи [12]. Различные люди воспринимают интенсивность и характер запаха по-разному. Реакция на запах формируется на основе имеющегося опыта и ожиданий и выражает степень раздражения, вызванного наличием ЗОВ. Минимальное содержание ЗОВ в воздухе, воспринимаемое обонянием человека, называется порогом обнаружения (ПО) (восприятия) запаха. Соответствующая характеристика обычно учитывается при обосновании предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ (ЗВ) в воздухе [13]. Перечень ПДК ЗВ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений, установленных СанПин 1.2.3685-21,

включает 716 наименований. В таблице приведены примеры, характеризующие максимально разовые значения ПДК (ПДК_{мр}) и ПО некоторых распространённых ЗОВ.

Из приведённых примеров видно, что ПО различных ЗОВ варьируют в широких пределах. Запах метилмеркаптана (запах «гнилой капусты»), этилмеркаптана («запах хряка»), сероводорода («запах тухлых яиц»), аммиака («запах нашатырного спирта»), хлора («удушливый запах»), триметиламина («запах тухлой рыбы») население может ощущать при их содержании в воздухе ниже установленных значений ПДК_{мр}.

Для многих дурнопахнущих веществ, попадающих в воздух при разложении биогенных отходов, ПДК не установлены. К таким веществам можно отнести индол и скатол – запах фекалий, путресцин и кадаверин – трупный запах, андростенон – запах пота и др. [16, 17]. При длительном воздействии на органы обоняния ПО многих ЗОВ могут существенно повышаться, таким образом, человек частично или полностью адаптируется к ЗЗ. При пре-

Таблица / Table

Предельно допустимые концентрации и пороги обнаружения некоторых запахообразующих веществ
Maximum allowable concentrations and detection thresholds for certain odor-forming substances

Одорант / Odorant	Порог обнаружения, мг/м ³ [14] Detection threshold, mg/m ³ [14]		ПДК _{мр} , мг/м ³ MPC _{ms} , mg/m ³
	min	max	
Аммиак / Ammonia	0,0266	39,6000	0,2
Ацетон / Acetone	47,47	1613,86	0,35
Бензол / Benzene	4,5	270,0	0,3
Ванилин / Vanillin	2,0 · 10 ⁻⁷		0,03
Диоксид серы / Sulfur dioxide	1,175	12,500	0,5
Диоксид азота / Nitrogen dioxide	0,23 [15]		0,2
Крезол (смесь изомеров) Cresol (isomers)	0,0012	22,0000	0,005
Метилмеркаптан Methyl mercaptan	4,0 · 10 ⁻⁵	0,0820	0,006
Масляная кислота Butyric acid	0,0010	9,0000	0,015
Скатол / Skatole	4,0 · 10 ⁻⁷	0,268	не установлена not installed
Сероводород / Sulfur	0,0007	0,0140	0,008
Триметиламин / Trimethyl amine	0,0008		0,15
Уксусная кислота / Acetic acid	2,5	250,0	0,2 (5*)
Фенол / Phenol	0,1786	22,42	0,01
Фурфурол / Furfural	0,024	20,000	10*
Хлор / Chlorine	0,03	15,00	0,1
Этилмеркаптан / Ethyl mercaptan	3,2 · 10 ⁻⁵	0,092	5 · 10 ⁻⁵

Примечание: жирным шрифтом выделены вещества, для которых ПДК_{мр} установлены ниже порога обнаружения; * – в воздухе рабочей зоны.
Note: bold type indicates substances for which MPC_{mr} are set below the detection threshold; * – in the air of the workplace.

кращении контакта с ЗОВ чувствительность к запахам чаще всего восстанавливается [18].

Восприятие смеси различных ЗОВ существенно отличается от восприятия каждого вещества по отдельности, при этом результат суммации может оказаться непредсказуемым [19]. При одновременном воздействии нескольких ЗОВ могут проявляться эффекты синергизма, маскировки или нейтрализации. Синергизм приводит к взаимному усилению двух или более ЗОВ, маскировка – к замене одного запаха на другой, нейтрализация (компенсация) – к исчезновению запаха или заметному снижению его интенсивности. Исследования взаимодействия ЗОВ ведутся в течение многих лет, однако до сих пор механизмы этих процессов не установлены [20]. Одоранты с выраженным неприятным запахом в смеси с другими летучими веществами могут создавать вполне приятные запаховые ощущения. Например, состав летучих компонентов, формирующих запах жареного кофе, включает более 50 различных веществ с приятным и неприятным индивидуальным запахом. Неприятный запах характерен для таких компонентов кофейного аромата, как изовалериановая кислота (прогорклый), диметилдисульфид и метилмеркаптан (капустный), фурфурилметилсульфид (луково-чесночный), 3-этилпиридин (запах тухлой рыбы) [21]. В экстрактах из свежего коровьего молока удалось выявить более 70 ЗОВ, включая ацетон, диметилсульфид, ацетальдегид (запах гнилых, прелых яблок), а также спирты, содержащие C_4 – C_7 атомов в молекуле (сивушный запах) [22, 23]. В козьем молоке было обнаружено 66 соединений с выраженным запахом, в том числе скатол [24]. Аромат сливочного масла обусловлен сложной композицией летучих веществ, включающей не менее 20 ЗОВ, в том числе сероводород, диметилсульфид, 3-метилбутаналь (горелый запах), гексановую (запах скотного двора) и бутановую (запах прогорклого масла) кислоты [25]. Чаще всего в приятных ароматах содержание дурнопахнущих ЗОВ незначительно, и запахи этих веществ существенно трансформируются в присутствии компонентов с приятным запахом.

Запахи, источниками которых являются отходы животноводства, канализационные стоки, целлюлозно-бумажное производство, свалки, бытовые отходы и т. п. также многокомпонентны, однако соответствующие запахи воспринимаются как крайне неприятные, навязчивые, раздражающие. В воздухе очистных сооружений канализационных систем иденти-

фицировано около 80 различных соединений, в том числе аммиак, сероводород, меркаптаны, предельные, непредельные, ароматические углеводороды и их производные, содержащие в молекулах атомы кислорода, азота, галогенов [26, 27]. Наибольший вклад в запах канализации вносят сероводород, метилмеркаптан, триметиламин [28]. В запахе свиного навоза идентифицировано более 230 компонентов, в том числе соединения серы, фенолы и индолы, летучие жирные кислоты, аммиак и амины. Запах этого отхода воспринимается как крайне неприятный [29–31].

Результаты научных исследований свидетельствуют о том, что смеси различных ЗОВ, в которых содержание отдельных компонентов ниже ПО, могут оказывать на человека вполне измеримое сенсорное воздействие, обусловленное синергическим эффектом. Соответствующий эффект в системах аналитического контроля ЗЗ пока учесть не удаётся [32].

Методы количественной оценки запахового загрязнения воздуха

Разработка методов анализа и количественной оценки запахов входит в число сложнейших задач современной аналитической химии. Для определения содержания ЗОВ в воздухе обычно используют 3 группы методов: инструментальные, сенсорные и математические. Инструментальные методы позволяют выявить и измерить концентрацию отдельных ЗОВ, сенсорные – определить наличие и характер запаха, а математические – оценить дисперсию ЗОВ в зависимости от рельефа и застройки территории с учётом природно-климатических факторов. Наиболее объективную информацию о характере и интенсивности ЗЗ можно получить на основе комбинированного подхода с применением сенсорных и инструментальных методов [33, 34]. Инструментальные методы базируются на применении различного газоаналитического оборудования. Основным достоинством этих методов является возможность разделения смеси ЗОВ на компоненты и измерение концентрации отдельных компонентов. К существенным недостаткам следует отнести невозможность выявления запаха как такового и количественного измерения его интенсивности и характера.

Для детекции ЗОВ в полевых или производственных условиях обычно применяют переносные газоанализаторы (ГА), предназначенные для определения концентрации

одного или нескольких летучих веществ в газовой смеси. С помощью ГА (датчиков загрязнения) можно измерять содержание в воздухе таких ЗОВ, как оксиды азота и серы, меркаптаны, сероводород, озон, формальдегид, этанол, фенолы и др. Для контроля широкого спектра ЗВ создаются системы газового контроля, которые могут включать десятки отдельных датчиков, работающих в автоматическом режиме [35]. Такие системы чаще всего используются в стационарных условиях. В настоящее время разработаны высокочувствительные ГА, позволяющие измерять содержание некоторых ЗОВ на уровне минимальных значений ПО. Основным недостатком таких приборов является ограниченный перечень детектируемых ЗОВ и высокая стоимость оборудования [36].

Более детальную информацию о ЗВ можно получить при использовании методов газовой хроматографии (ГХ), масс-спектрометрии (МС), спектрального анализа (СА). Газовая хроматография отличается высокой чувствительностью (до 10^{-2} – 10^{-3} мг/м³), точностью (погрешность измерений порядка $\pm 5\%$), универсальностью и экспрессностью. Современные хроматографы пригодны для выполнения анализа небольших по объёму проб газа (порядка 100 см³), позволяют эффективно разделять газовую смесь на отдельные компоненты и идентифицировать практически любые известные летучие соединения в составе смеси, испаряющиеся без разложения [37]. В настоящее время выпускаются портативные газовые хроматографы, пригодные для детектирования весьма широкого перечня ЗВ в полевых условиях [38]. Возможности ГХ существенно расширяются за счёт сочетания этого метода с МС методом [39]. Масс-спектрометрия находит применение для количественного определения в пробах воздуха различных органических веществ (в том числе термолабильных), изучения их состава и структуры [40]. Хромато-масс-спектрометрический анализ обеспечивает возможность разделения смеси компонентов, детектирование соответствующих компонентов и их идентификацию [41].

Весьма перспективными в плане анализа запахов могут стать методы СА. К их преимуществам можно отнести возможность проведения дистанционного анализа большого числа газов в масштабе реального режима времени, высокую чувствительность, отсутствие пробоподготовки, пригодность использования результатов анализа для построения трёхмерных карт содержания ЗВ в

атмосфере [42]. Оптическая система газового зондирования применяется в конструкции оптического электронного носа – устройства, предназначенного для обнаружения и измерения характера и интенсивности запахов [43].

Электронный нос (Electronic Nose, EN) представляет собой сложную систему, включающую набор датчиков (химических сенсоров) для обнаружения ЗОВ и блок обработки поступающих от сенсоров данных, предназначенный для идентификации и классификации запахов [44]. Для того чтобы EN мог не только выявлять ЗОВ в воздухе, но и определять интенсивность запаха и его характер, используются искусственные нейронные сети. Благодаря успехам в области разработки высокочувствительных компактных датчиков и эффективных технологий машинного обучения, исследования в сфере совершенствования EN считаются весьма перспективными [45, 46].

Несмотря на широкие аналитические возможности, физико-химические методы пока не могут заменить органы обоняния человека. Количественное измерение запахов, основанное на обонянии человека, реализуется в ольфактометрическом методе [47]. Для измерения запахов этим методом применяют специальные приборы – ольфактометры. Оценку запаха методом динамической ольфактометрии (ДО) выполняют в лабораторных условиях. В ольфактометре проба загрязнённого ЗОВ воздуха в стандартных условиях подвергается разбавлению нейтральным (не имеющим запаха) газом (обычно чистым воздухом или азотом) до уровня ниже ПО. Постепенно степень разбавления понижается. Пробы газа разной концентрации представляются экспертам для определения наличия запаха. Степень разбавления, при которой 50% экспертов обнаруживают наличие ЗОВ, считается ПО соответствующего запаха. Согласно ASTM E544-99, концентрация запаха представляет собой объём нейтрального газа (м³), необходимый для разбавления пробы одорированного газа до достижения ПО. Измерения запаха на ольфактометре позволяют выразить его концентрацию в единицах запаха (ЕЗ) на кубический метр (ЕЗ/м³). Согласно ГОСТ Р 58578-2019, ЕЗ представляет собой количество (смеси) одорантов в 1 м³ пахучего газа (при температуре 20 °С и давлении 101,3 кПа) при достижении порога выявления экспертной комиссией. На основании данных о концентрации запаха можно рассчитать параметры его рассеивания на конкретной территории в конкретных погодных-климатических

условиях [48, 49]. Метод ДО нашёл широкое применение в европейских странах, где принят специальный стандарт EN 13725:2003, регламентирующий процедуру выполнения ольфактометрических измерений. В США для оценки ЗЗ чаще используется метод полевой ольфактометрии, в Японии – метод «трёх мешков» (Triangle Odor Bag Method) [50]. Полевая ольфактометрия ориентируется на использование портативных ольфактометров, пригодных для выполнения замеров запаха в полевых условиях. За ЕЗ в этом методе принято отношение D/T , где D – объём отфильтрованного воздуха, используемого для разбавления воздуха с запахом до ПО; T – объём воздуха с запахом. Применение метода не требует отбора проб газа и транспортирования их в лабораторию для проведения измерений [51]. Метод «трёх мешков» (ТМ) отличается от метода ДО способом представления образцов воздуха экспертам. Разные дозы ЗОВ вводят в один из трёх мешков с чистым воздухом. Эксперты должны определить, в каком мешке находится ЗОВ. Количественно запах оценивается величиной, получившей название «индекс запаха», представляющей собой десятичный логарифм концентрации запаха. Соответствующая количественная оценка интенсивности выбросов запахов от источника принята Министерством окружающей среды Японии в 1995 г. Результаты, полученные методом ТМ, хорошо согласуются с результатами оценки запаха методом ДО [52, 53].

Кроме инструментальных методов для контроля ЗЗ находят применение и методы, не требующие специального приборного оснащения: опросы населения, анализ жалоб на ЗЗ, методы гражданской науки (Citizen Science). Гражданская наука представляет собой научную работу, которую выполняют граждане (волонтёры) совместно с учёными или под их руководством. Волонтёры привлекаются к сбору информации, анализу массивов данных, совместной выработке решений и т. п. В ЕС запущен проект под названием «Distributed Network for Odour Sensing Empowerment and Sustainability» (D-NOSES). Для борьбы с ЗЗ в рамках этого проекта создано партнёрство мирового уровня, объединяющее экспертов в области гражданской науки и совместного творчества, международные ассоциации, учёных, занимающихся исследованиями в области запахов, университеты, малые и средние предприятия, местную администрацию и государственные органы из 9 стран. Проект получил финансирование от

Европейского союза Horizon 2020 Science with & for Society Call (SwafS) в рамках грантового соглашения № 789315 [54].

Основные подходы к регулированию запахового загрязнения

Проблема регулирования ЗЗ приобрела наибольшую остроту в странах с высокой плотностью населения и развитым животноводством [55]. Многие государства контролируют ЗЗ на законодательном уровне, при этом принятые критерии оценки запахов в разных странах или территориальных образованиях одной страны (провинциях, городах, штатах и т. п.) существенно различаются между собой [56]. При разработке и корректировке законодательства о запахах, как правило, учитываются такие факторы, как устойчивое развитие, охрана окружающей среды, социально-экономические особенности конкретной территории или секторов экономики. В некоторых странах при нормировании ЗЗ в расчёт принимаются только неприятные запахи, вызывающие раздражение населения [57]. Для количественной оценки неприятных запахов широкое применение нашли такие характеристики как частота, интенсивность, продолжительность, гедонистический тон и местоположение (факторы FIDOL: Frequency, Intensity, Duration, Offensiveness and Location). Соответствующие характеристики предлагается учитывать при разработке нормативов ЗЗ. Например, можно допустить более продолжительное присутствие слабых запахов в атмосферном воздухе и ограничить время и частоту выброса интенсивных неприятных запахов [58, 59]. В Европе наблюдается тенденция к установлению количественных критериев ЗЗ с определением уровня, при котором «не существует обоснованной причины для раздражения населения». Основным условием успешной реализации соответствующего подхода является наличие надёжных методов измерения запаха [60].

Регулирование запахов на юридическом уровне обычно опирается на следующие подходы: сопоставление концентрации запаха и статистических данных по содержанию отдельных химических веществ в атмосферном воздухе с критериями их воздействия на население (стандарт максимального воздействия); установление определённых расстояний (защитных зон) от источников эмиссии ЗОВ до селитебных территорий (стандарт разделительных расстояний); установление

максимально допустимого уровня выбросов для смесей одорантов и отдельных химических веществ (максимальный стандарт выбросов); количество поступающих жалоб или уровень раздражения, определённый с помощью опросов населения (стандарт максимального раздражения); требование внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) для минимизации выбросов ЗОВ (технологический стандарт). Наиболее широкое применение находит первый подход [61].

Опыт разных стран показывает, что законодательство о запахах при установлении допустимых уровней ЗЗ должно опираться на результаты ольфактометрических исследований, при утверждении новых проектов или расширении существующих производств следует использовать математические модели рассеивания ЗОВ, учитывать ограничения FIDOL и критерий соседства, предусматривать применение наилучших доступных технологий в сфере предотвращения ЗЗ [62].

Заключение

Обзор опубликованных источников, посвящённых проблеме ЗЗ, свидетельствует о наличии основательной научной базы, позволяющей разработать общую методологию и комплекс конкретных мер, направленных на защиту населения от раздражающих запахов. Специфика ЗЗ не позволяет констатировать наличие или отсутствие запахов на основании показаний обычного газоаналитического оборудования, однако это оборудование необходимо для определения компонентного состава запахов. Наиболее объективную информацию о наличии и концентрации запахов можно получить с помощью ольфактометрического метода. Опыт различных стран свидетельствует о том, что нормативные акты, направленные на контроль и минимизацию ЗЗ, могут быть приняты на региональном уровне. Такой подход позволяет максимально полно учесть социально-экономические особенности конкретных территорий и оптимизировать затраты бюджета и предприятий – источников ЗОВ на реализацию мероприятий по защите окружающей среды и населения от запахового загрязнения.

References

1. Sebastian S., Puranik N. Recent concepts about sense of smell, odorant receptors and physiology of olfaction-an insight // *Physiol Pharmacol*. 2016. V. 20. P. 74–82.

2. Herz R.S., Schankler C., Beland S. Olfaction, emotion and associative learning: effects on motivated behavior // *Motivation and Emotion*. 2004. V. 28. No. 4. P. 363–383. doi: 10.1007/s11031-004-2389-x

3. Weber S.T., Heuberger E. The impact of natural odors on affective states in humans // *Chemical Senses*. 2008. V. 33. No. 5. P. 441–447. doi: 10.1093/chemse/bjn011

4. Millot J.L., Brand G., Morand N. Effects of ambient odors on reaction time in humans // *Neuroscience Letters*. 2002. V. 322. No. 2. P. 79–82. doi: 10.1016/s0304-3940(02)00092-7

5. Berezina T.N. The emergence of positive and negative basic emotions under the influence of basic smells // *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta im. M.A. Sholokhova. Pedagogika i psikhologiya*. 2011. No. 3. P. 59–69 (in Russian).

6. Gebicki J., Dymerski T., Rutkowski S. Identification of odor of volatile organic compounds using classical sensory analysis and electronic nose technique // *Environment Protection Engineering*. 2014. V. 40. No. 1. P. 103–116. doi: 10.5277/epe140108

7. Budarina O.V., Sabirova Z.F., Shipulina Z.V. Analysis of international experience of studying of the odour air pollution impact on population health // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2019. No. 5. P. 88–92 (in Russian).

8. Goshin M.E., Budarina O.V., Ingel F.I. The odours in the ambient air: analysis of the relationship with the state of health and quality of life in adults residing in the town with food industries // *Gigiena i Sanitaniya*. 2020. V. 99. No. 12. P. 1339–1345 (in Russian).

9. Terent'ev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Pilip L.V. Reducing the emission of odorous substances in industrial pig breeding enterprises // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 113–120. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120

10. Sucker K., Both R., Bischoff M., Guski R., Winneke G. Odor frequency and odor annoyance. Part I: assessment of frequency, intensity and hedonic tone of environmental odors in the field // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2008. V. 81. No. 6. P. 671–682. doi: 10.1007/s00420-007-0259-z

11. Dravnieks A., Jarke F. Odor threshold measurement by dynamic olfactometry: significant operational variables // *Air & Waste Management Association*. 1980. V. 30. No. 12. P. 1284–1289. doi: 10.1080/00022470.1980.10465182

12. Budarina O.V. The actual problems of odour regulation in ambient air and ways of their decision in modern conditions // *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*. 2013. No. 5 (42). P. 435–437 (in Russian).

13. Pinigin M.A., Budarina O.V., Safiulin A.A. The development of hygienic basis of odour regulation and control in ambient air and ways of harmonization in this field // *Gigiena i sanitaniya*. 2012. No. 5. P. 72–75 (in Russian).

14. Ruth J.H. Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances: a review // *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1986. V. 47. No. 3. P. 142–151. doi: 10.1080/15298668691389595
15. Silaeva P., Silaev A.V. Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises // *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*. 2018. No. 1. P. 63–72 (in Russian).
16. Hussain A., Saraiva L.R., Ferrero D.M., Ahuja G., Krishna V.S., Liberles S.D., Korsching S.I. High-affinity olfactory receptor for the death-associated odor cadaverine // *PNAS*. 2013. V. 110. No. 48. P. 19579–19584. doi: 10.1073/pnas.1318596110
17. Mahmoud M.A., Tybussek T., Loos H., Wagenstaller M., Buettner A. Odorants in fish feeds: A potential source of malodors in aquaculture // *Frontiers in Chemistry*. 2018. V. 6. Article No. 241. doi: 10.3389/fchem.2018.00241
18. Dalton P. Psychophysical and behavioral characteristics of olfactory adaptation // *Chemical Senses*. 2000. V. 25. No. 4. P. 487–492. doi: 10.1093/chemse/25.4.487
19. Carrera F., Donoso-Bravo A., Souto-Gonzalez J.A., Ruiz-Filippi G. Modeling the odor generation in WWTP: An integrated approach review // *Water, Air and Soil Pollut.* 2014. V. 225. No. 6. P. 1–15. doi: 10.1007/s11270-014-1932-y
20. Szulczynski B., Arminski K., Namiesnik J., Gebicki J. Determination of odour interactions in gaseous mixtures using electronic nose methods with artificial neural networks // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 2. Article No. 519. doi: 10.3390/s18020519
21. Seninde D.R., Chambers E. Coffee flavor: A review // *Beverages*. 2020. V. 6. No. 3. Article No. 44. doi: 10.3390/beverages6030044
22. Toso B., Procida G., Stefanon B. Determination of volatile compounds in cows' milk using headspace GC-MS // *Journal of Dairy Research*. 2002. V. 69. No. 4. P. 569–577. doi: 10.1017/S0022029902005782
23. Bendall J.G. Aroma compounds of fresh milk from New Zealand cows fed different diets // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001. V. 49. No. 10. P. 4825–4832. doi: 10.1021/jf010334n
24. Siefarth C., Buettner A. The aroma of goat milk: seasonal effects and changes through heat treatment // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014. V. 62. No. 49. P. 11805–11817. doi: 10.1021/jf5040724
25. Peterson D.G., Reineccius G.A. Characterization of the volatile compounds that constitute fresh sweet cream butter aroma // *Flavour and Fragrance Journal*. 2003. V. 18. No. 3. P. 215–220. doi: 10.1002/ffj.1192
26. Zhu Y., Zheng G., Gao D., Chen T., Wu F., Niu M., Zou K. Odor composition analysis and odor indicator selection during sewage sludge composting // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016. V. 66. No. 9. P. 930–940. doi: 10.1080/10962247.2016.1188865
27. Dincer F., Muezzinoglu A. Odor-causing volatile organic compounds in wastewater treatment plant units and sludge management areas // *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 2008. V. 43. No. 13. P. 1569–1574. doi: 10.1080/10934520802293776
28. Park S. Odor characteristics and concentration of malodorous chemical compounds emitted from a combined sewer system in Korea // *Atmosphere*. 2020. V. 11. No. 6. Article No. 667. doi: 10.3390/atmos11060667
29. Cho S., Hwang O., Park S. Effect of dietary protein levels on composition of odorous compounds and bacterial ecology in pig manure // *Asian-Australas J Anim Sci*. 2015. V. 28. No. 9. P. 1362–1370. doi: 10.5713/ajas.15.0078
30. Schiffman S.S., Bennett J.L., Raymer J.H. Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2001. V. 108. P. 213–240.
31. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying manure effluent on its microbiological characteristics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 161–167. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
32. Miyazawa T., Gallagher M., Preti G., Wise P.M. Synergistic mixture interactions in detection of perithreshold odors by humans // *Chemical Senses*. 2008. V. 33. No. 4. P. 363–369. doi: 10.1093/chemse/bjn004
33. Giungatoa P., Gilio A.D., Palmisani J., Marzocca A., Mazzone A., Giua R., Gennaro G. Synergistic approaches for odor active compounds monitoring and identification: State of the art, integration, limits and potentialities of analytical and sensorial techniques // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2018. V. 107. P. 116–129. doi: 10.1016/j.trac.2018.07.019
34. Kim K.H., Park S. Y. A comparative analysis of malodor samples between direct (olfactometry) and indirect (instrumental) methods // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. No. 20. P. 5061–5070. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.017
35. Air pollution monitoring [Internet resource] https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/app-briefs/Semtech_Enviro_AirPollution_AppBrief-FINAL.pdf / (Accessed: 30.11.2021).
36. Rybak V.A., Ryabichina O.P. Hardware-software complex for monitoring atmospheric air pollution and selecting optimal movement route // *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. No. 52. P. 6–17 (in Russian). doi: 10.17217/2079-0333-2020-52-6-17
37. Pavlenko A.A., Ryazantseva L.T. Gas chromatography as a method for monitoring the ecological safety of environmental objects // *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*. 2012. No. 1 (3). P. 122–124 (in Russian).
38. Anopchenko L.Yu., Lugovskaya A.Yu. The use of different methods for environmental monitoring of atmo-

- spheric air // *Interesko Geo-Sibir*. 2014. No. 2. P. 84–88 (in Russian).
39. Debonneville C., Chaintreau A. Quantitation of suspected allergens in fragrances: Part II. Evaluation of comprehensive gas chromatography–conventional mass spectrometry // *Journal of Chromatography A*. 2004. V. 1027. No. 1–2. P. 109–115. doi: 10.1016/j.chroma.2003.08.080
40. Pisarev D.I. Classical and modern methods of mass spectrometry // *Nauchnye vedomosti belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Meditsina. Farmatsiya*. 2012. No. 10–2 (129). P. 5–11 (in Russian).
41. Milman B.L., Zhurkovich I.K. Summarized criteria of chemical compounds identification using the chromatography-mass spectrometry // *Analitika i kontrol*. 2020. V. 24. No. 3. P. 164–173 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2020.24.3.003
42. Geiko P.P., Smirnov S.S. Atmosphere halogen oxides concentration retrieving by differential optical spectroscopy in the UV region of the spectrum // *Doklady TUSUR*. 2017. No. 4. P. 33–38 (in Russian).
43. Zhao Z., Tian F., Liao H., Yin X., Liu Y., Yu B. A novel spectrum analysis technique for odor sensing in optical electronic nose // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. V. 222. P. 769–779. doi: 10.1016/j.snb.2015.08.128
44. Karakaya D., Ulucan O., Turkan M. Electronic nose and its applications // *International Journal of Automation and Computing*. 2020. V. 17. No. 2. P. 179–209. doi: 10.1007/s11633-019-1212-9
45. Jia P., Meng F., Cao H., Duan S., Peng X., Xu M. Training technique of electronic nose using labeled and unlabeled samples based on multi-kernel LapSVM // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. V. 294. P. 98–105. doi: 10.1016/j.snb.2019.05.034
46. Wilson A.D. Applications of electronic-nose technologies for noninvasive early detection of plant, animal and human diseases // *Chemosensors*. 2018. V. 6. No. 4. Article No. 45. doi: 10.3390/chemosensors6040045
47. Brattoli M., De Gennaro G., De Pinto V., Loiotile A.D., Lovascio S., Penza M. Odour detection methods: olfactometry and chemical sensors // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 5. P. 5290–5322. doi: 10.3390/s110505290
48. Farrell J.A., Murlis J., Long X., Li W., Card R.T. Filament-based atmospheric dispersion model to achieve short time-scale structure of odor plumes // *Environmental Fluid Mechanics*. 2002. V. 2. P. 143–169. doi: 10.1023/A:101628370283
49. Capelli L., Sironi S., Del Rosso R., Guillot J.M. Measuring odours in the environment vs. dispersion modeling: A review // *Atmospheric Environment*. 2013. V. 79. P. 731–743. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.029
50. Svitskov S.V., Malikh O.S. World experience in odor regulation for water and wastewater treatment plants // *Nailuchshie dostupnye tekhnologii*. 2020. No. 4. P. 38–43 (in Russian).
51. Damuchalia A.M., Guob H. Evaluation of a field olfactometer in odour concentration measurement // *Biosystems Engineering*. 2019. V. 187. P. 239–246. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.09.007
52. Nagata Y. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method // *Ministry of the Environment, Government of Japan: Tokyo, Japan*, 2003. P. 118–127.
53. Ueno H., Amano S., Merecka B., Kośmider J. Difference in the odor concentrations measured by the triangle odor bag method and dynamic olfactometry // *Water Science & Technology*. 2009. No. 59 (7). P. 1339–1342. doi: 10.2166/wst.2009.112
54. Distributed network for odour sensing, empowerment and sustainability [Internet resource] <https://cordis.europa.eu/project/id/789315/> (Accessed: 08.12.2021).
55. Melsea R.W., Oginka N.W.M., Rulkens W.H. Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers // *Biosystems Engineering*. 2009. V. 104. No. 3. P. 289–298. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.07.009
56. Analysis of existing regulations in odour pollution, odour impact criteria 1 [Internet resource] <https://dnoses.eu/wp-content/uploads/2019/10/D2.2-Analysis-of-existing-regulation-in-odour-pollution-odour-impact-criteria-1.pdf> / (Accessed: 03.12.2021).
57. Bokowa A., Diaz C., Koziel J.A., McGinley M., Barclay J., Schauburger G., Guillot J.M., Sneath R. Short introduction to the summary and evaluation of the odour regulations worldwide // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. V. 85. P. 121–126. doi: 10.3303/CET2185021
58. Invernizzi M., Capelli L., Sironi S. Quantification of odour annoyance-nuisance // *Chemical Engineering Transactions*. 2016. V. 54. P. 205–210. doi: 10.3303/CET1654035
59. Nicell J.A. Assessment and regulation of odour impacts // *Atmospheric Environment*. 2009. V. 43. No. 1. P. 196–206. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.033
60. Odor regulation and the history of odor measurement in Europe [Internet resource] <https://www.semanticscholar.org/paper/Odor-Regulation-and-the-History-of-Odor-Measurement-Harreveld-OdourNet/f82f17784ba9460ce9c3a73fd67d363bd7d2cd7a/> (Accessed: 03.12.2021).
61. Brancher M., Griffiths K.D., Franco D., de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1531–1570. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.160
62. Loriato A.G., Salvador N., Santos J.M., Moreira D.M. Odour – a vision on the existing regulation // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. V. 30. P. 25–30. doi: 10.3303/CET1230005

Using digital maps to identify areas of mass development of phytoplankton in small freshwater reservoirs

© 2022. T. I. Kutyavina¹ ORCID: 0000-0001-7957-0636*

V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487*

T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047*

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

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

e-mail: kutyavinati@gmail.com

Based on the results of field observations and interpretation of space images, the authors of the article have analyzed the spatial distribution and temporal dynamics of phytoplankton development in four reservoirs of the Kirov region (Russia) from 2015 to 2021. Characteristic features of reservoirs are high color and turbidity of water, high content of organic substances in water. To identify areas of mass development of phytoplankton, the authors calculated four spectral vegetation indices. These are the normalized difference algoindex (NDAI), the normalized difference vegetation index (NDVI), the chlorophyll *a* concentration index (TBDO) and the normalized difference turbidity index (NDTI). The initial data for the calculation were satellite images from the Sentinel-2 satellite, posted on the resource EarthExplorer (U.S. Geological Survey). Based on the results of the calculation of spectral indices in the QGIS software product, the authors built digital maps of the studied reservoirs. They noted that phytoplankton developed mainly in coastal shallow areas of reservoirs. The mass development of algae and cyanobacteria was most often observed in July and August. This is typical for reservoirs of temperate zone. The most intense “blooming” of water was in July and August 2016, 2018, 2020 and 2021. At the same time, the following species dominated in phytoplankton samples: *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunnthaler, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault.

Keywords: reservoir, eutrophication, phytoplankton, cyanobacteria, remote sensing of the Earth, spectral indices.

УДК 574.583+528.88

Использование цифровых карт для выявления участков массового развития фитопланктона на акватории малых пресноводных водоёмов

© 2022. Т. И. Кутявина¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Рутман¹, м. 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 Российской академии наук, 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28, e-mail: kutyavinati@gmail.com

По результатам полевых наблюдений и дешифрирования космических снимков проанализировано пространственное распределение и временная динамика развития фитопланктона в четырёх водохранилищах Кировской области (Россия) за период с 2015 по 2021 гг. Характерными особенностями водохранилищ являются высокая цветность и мутность вод, высокое содержание в воде органических веществ. Для выявления участков массового развития фитопланктона был проведён расчёт четырёх спектральных вегетационных индексов. Это нормализованный разностный альгоиндекс (NDAI), нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), индекс концентрации хлорофилла *a* (TBDO) и нормализованный разностный индекс мутности воды (NDTI). По результатам расчёта спектральных индексов в программном продукте QGIS построены цифровые карты изучаемых водохранилищ. Отмечено, что фитопланктон развивался преимущественно на прибрежных мелководных участках водохранилищ.

Массовое развитие водорослей и цианобактерий чаще всего наблюдали в июле и августе. Это является типичным для водохранилищ умеренной зоны. Наиболее интенсивное «цветение» воды отмечали в июле и августе 2016, 2018, 2020 и 2021 гг. При этом в пробах фитопланктона преобладали следующие виды: *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunnthaler, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault.

Ключевые слова: водоём, эвтрофирование, фитопланктон, цианобактерии, дистанционное зондирование Земли, спектральные индексы.

At present, the most important factor in the negative impact of human activity on the productivity and ecological state of water bodies is anthropogenic eutrophication. The unfavorable consequences of eutrophication are the “bloom- ing” of water, the massive development of higher aquatic plants, and the violation of the oxygen regime of water bodies. This leads to a decrease in fish productivity and the recreational potential of water bodies, has a negative impact on water purification systems for drinking water supply from water bodies, and causes allergic reactions in humans and animals. The problem of intensive “bloom- ing” of water, or the mass development of algae and cyanobacteria, is very relevant for freshwater bodies of various countries [1, 2]. To develop measures to preserve the quality of water bodies, it is necessary to use environmental monitoring data. Environmental monitoring is an information system for observing, assess- ing and forecasting changes in the state of the environment, created to highlight the anthro- pogenic component of these changes against the background of natural processes. Solving the problems of environmental monitoring re- quires the use of analytical tools that provide the presentation of actually obtained data in a spatially distributed form, which simplifies the assessment of their current state and visualiza- tion of future changes. One of such means is ecological maps [3]. To study the state of water bodies, digital maps are widely used, built ac- cording to the data of remote sensing of the Earth and, in particular, according to the calculation of spectral vegetation indices. For example, a map of the distribution of chlorophyll *a* concentra- tions over the water area was constructed for Lake Beysehir, the largest freshwater lake and source of drinking water in Turkey, based on *in situ* observations and the results of interpretation of Terra ASTER satellite data [4]. Chlorophyll *a* is the main pigment of phytoplankton. Its con- centration in water can be used to assess the trophic state of the reservoir and the quality of the water in it. A series of maps built according to the NDVI calculation data for a long-term period was used to monitor the dynamics of the vegetation cover of estuaries in the Sea of Azov region [5]. Maps built on the basis of the cal-

culatation of the NDVI and NDWI indices were used to assess and predict the ecological state of Lake Manzherok (Altai, Russia) after dredg- ing [6]. The maps constructed according to the NDVI and MNDWI calculation data were used to estimate the area of the water area and the dynamics of macrophyte overgrowth of the Kras- nodar Reservoir [7] and subaquatic landscapes of the Zeya Reservoir (Russia) [8]. The spatial and temporal distribution of chlorophyll *a* in the water area of the Krasnodar reservoir was studied using maps constructed according to the NDCI calculation data [9]. To assess the spatial distribution of chlorophyll *a* and suspended solids in the lakes of the Czech Republic, NDVI, NDTI, SR, SRWC, and various modifications of the NDWI, MNDWI, WRI, and AWEI indices were calculated [10]. As can be noted, the tasks solved using digital maps built from the values of spectral indices are very diverse. The choice of specific spectral indices for research depends on the physical and geographical features of the studied water bodies and on the nature of their use.

The purpose of this research is to evaluate the possibility of using digital maps built ac- cording to the calculation data of NDAI, NDVI, TBDO and NDTI to identify areas of mass phyto- plankton development in the water area of small freshwater reservoirs of the Kirov region.

Objects and research methods

The Kirov region is located in the north- east of the Russian Plain in the central-eastern part of European Russia. The largest reservoirs are in the northeastern part of the region, in the Vyatka-Kama physical and geographi- cal district. These are the Belokholunitskoye, Omutninskoye, Bolshoye Kirsinskoye and Chernokholunitskoye reservoirs. These are channel lowland reservoirs created in the period from 1729 to 1810. The surface area of water bodies is 3.0 to 17.4 km², length – 4.5 to 11.6 km, width – 0.7 to 3.0 km. The reservoirs were formed under similar geographical conditions. Reservoirs have long been used to supply water to metallurgical enterprises. All reservoirs belong to the category of reservoirs of cultural and household water use.

On the banks of the reservoirs there are settlements, industrial enterprises, health-improving and recreational facilities, and horticultural societies. The reservoirs of the Kirov region are subject to the development of eutrophication processes [11]. Characteristic features of reservoirs are high values of color (from 42 to 398 degrees of color on the chromium-cobalt scale) and water turbidity (above 2 units of turbidity according to formazin), high content of organic substances in water. These features of reservoirs are associated with both the natural conditions of the territory and the anthropogenic impact on water bodies. In order to assess the degree of eutrophication of reservoirs and offer recommendations for improving their ecological state, researchers of the Biomonitoring Research Laboratory of Vyatka State University have been conducting regular monitoring studies in the water area of reservoirs since 2011. Monitoring studies include a route inspection of the water area of reservoirs and coastal areas, identification of thickets of higher aquatic and coastal aquatic plants, areas of mass development of phytoplankton, water sampling, algological and hydrochemical analyzes, water biotesting. A detailed survey of the entire water area of reservoirs requires serious labor, time and financial costs. As a rule, during the growing season it turns out to make only 5–6 trips to the objects of study. In order to reduce the cost of fieldwork on reservoirs and to quickly obtain data throughout the entire growing season for the entire study area, we began to use satellite Sentinel-2 imagery in our work since 2019 in order to study the ecological state of the reservoirs of the Kirov region.

The original space images are freely available on <https://earthexplorer.usgs.gov/>. For our research we chose low-cloud images taken from May to September (2015–2024). We processed satellite images, calculated spectral indices, and built digital maps using the QGIS software version 3.20. NDAI was calculated according to [12], NDVI – according to [13], TBDO – according to [14], and NDTI – according to [15]. When constructing digital maps for each of the calculated indices, we empirically selected our own scale of values. The data obtained in the calculation of spectral indices were compared with the results of field studies.

Results and Discussion

According to the results, the NDAI values in the water area of the studied reservoirs during the growing season varied widely: from 0.3

to 1.0. On most digital maps, the value of the algoindex increased in the direction from the central deep-water areas to the coastal shallow areas of the reservoirs, while the range of NDAI values for the central and coastal areas reached 0.15–0.20. When visually inspecting the water area of the reservoirs and comparing the results of algological analysis of samples from different parts of the water area, we also noted that the biomass of phytoplankton in coastal shallow areas was higher than in deep water areas. The optical density of water taken at a depth of 0.3 m in the Omutninskoye reservoir in areas of mass development of phytoplankton, measured at a wavelength of 615 nm in a cuvette with an optical path length of 10 mm, was 0.150–0.220. In the central deep-water areas of the water area of the Omutninskoye reservoir, where phytoplankton accumulations were not visually detected, the optical density of water at the same depth was 0.044–0.056. A similar distribution of NDAI values over the water area and an increase in phytoplankton biomass in shallow coastal areas compared to the central part of the reservoir were noted for Lake Lukomskoe in Belarus [16]. A higher level of phytoplankton development (by 2–3 times) in shallow waters compared to the channel in summer is also characteristic of the Volga reservoirs (Russia) [17]. This is due to a number of factors: more intense heating of the aquatic environment and an increased content of biogenic elements in coastal areas. Probably, the same factors influenced the development of phytoplankton in the shallow waters of the reservoirs of the Kirov region.

The minimum NDAI values (0.32–0.38) were noted in May, early June 2017 and 2020, the maximum (0.75–0.84) – in July and August 2016, 2019 and 2020. The visually observed “blooming” of the water corresponded to NDAI values above 0.55. The water area of the Matyr reservoir (Russia), which is comparable to the reservoirs of the Kirov region in terms of morphometric parameters and hydrochemical characteristics, during the observation period from May to September 1984–2014, had NDAI values averaged from 0.26 to 0.44 [18], the water area of Lake Lukomskoe (Belarus) on May 18, 2015 – from 0.42 to 1.16 [16], and in the water area of the Kakhovka reservoir (Ukraine) in August 2010 – from 0.12 to 1.01 [19].

If we trace the time dynamics of changes in NDAI values, we can note that from May to July, the average value of NDAI for all water areas increased, and then, from July to September, it decreased (Fig. 1).

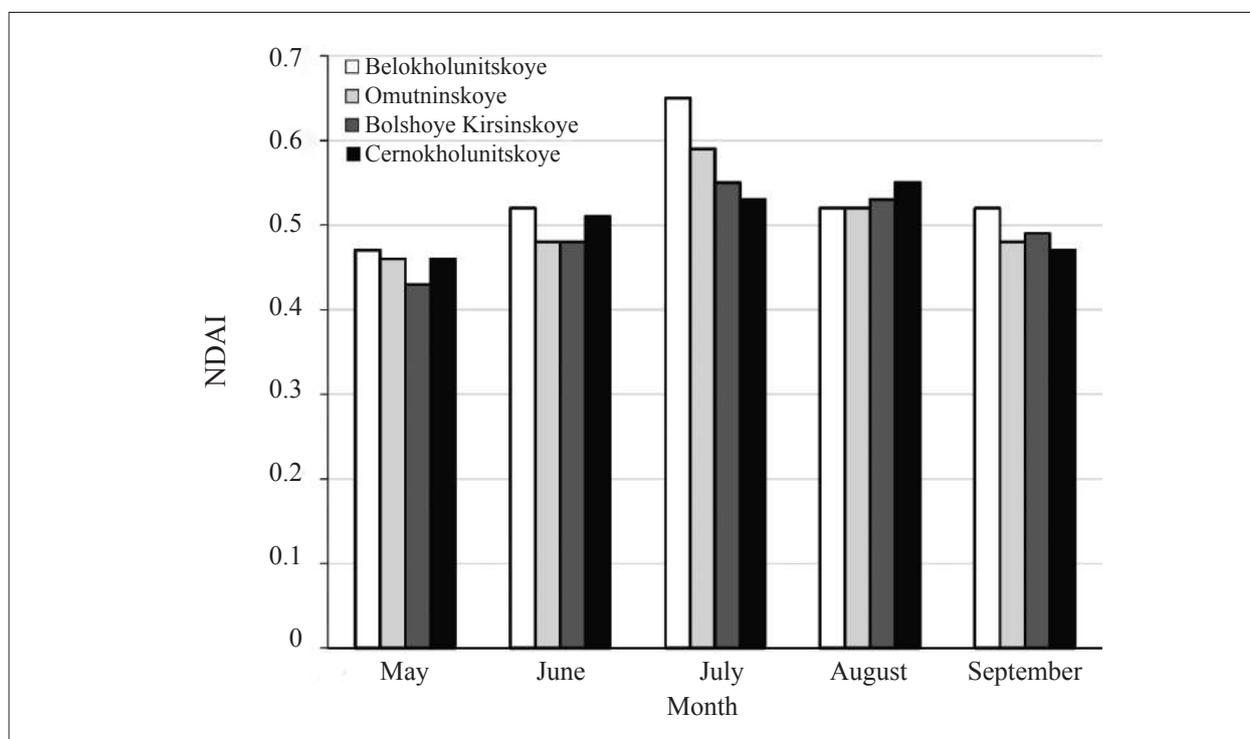


Fig. 1. NDAI values for the largest reservoirs in the Kirov region, calculated from satellite Sentinel-2 imagery for 2015–2021

It is known that seasonal changes in the content of chlorophyll *a*, by which the phytoplankton biomass is estimated, can be explained by the dynamics of weather and hydrological conditions [17]. Increase in NDAI values from May to July in 2015–2021 is consistent with the increase in air temperature in the same observation period. The average air temperature in May reached 15 °C, in June and September – 17 °C, in July – 22 °C, in August – 20 °C.

Outbreaks of intensive development of phytoplankton visually and on digital maps were recorded in all the studied reservoirs in August 2016 (images from 25.08.2016, NDAI 0.58 to 0.80), July 2020 (08.07.2020, NDAI 0.60 to 0.84) and August 2021 (08.07.2021, NDAI 0.61 to 0.84). Also, the massive development of phytoplankton was noted in the Bolshoye Kirsinskoye and Omutninskoye reservoirs in 2018 (images from 26.07.2018, NDAI 0.62 to 0.80), in the Bolshoye Kirsinskoye, Omutninskoye and Chernokholunitskoye reservoirs – in 2021 (images from 01.09.2021, NDAI 0.57 to 0.92). The highest NDAI values on digital maps were noted in shallow waters along the shores of reservoirs and in bays. The depths in these areas are shallow (up to 3 m), water exchange is slow, and the water warms up well. Weather conditions were also favorable for the development of phytoplankton: in August 2016, July 2018

and 2020 the days were mostly clear, calm, and the average monthly air temperature was quite high (20–22 °C), which also contributed to the “blooming” of the water.

With the help of NDAI index images, one can quite clearly trace the dynamics of phytoplankton development. Figures 2 and 3 (see color insert I, II) shows images taken before and during the intense “blooming” of water in the Omutninskoye reservoir.

It can be noted that in the image taken on July 5, 2021 (Fig. 2, see color insert I), the maximum NDAI values are observed mainly along the banks of the reservoir. In the image taken on July 13, 2021 (Fig. 3, see color insert II), the areas characterized by intense “blooming” of water increased significantly in the central section of the reservoir and in the bay. Phytoplankton samples taken at these areas were dominated by *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter, *A. spiroides* Klebahn, *A. planctonica* Brunthaler, *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault.

In addition to calculating NDAI, we also calculated other spectral indices used to study water bodies. According to the results of NDVI calculation, the value of this index in the water areas of the studied reservoirs varied from -0.5 to 0.4. According to [20], the NDVI value for the surface of water bodies is usually less than zero. Positive values of the index, as a rule, indicate the

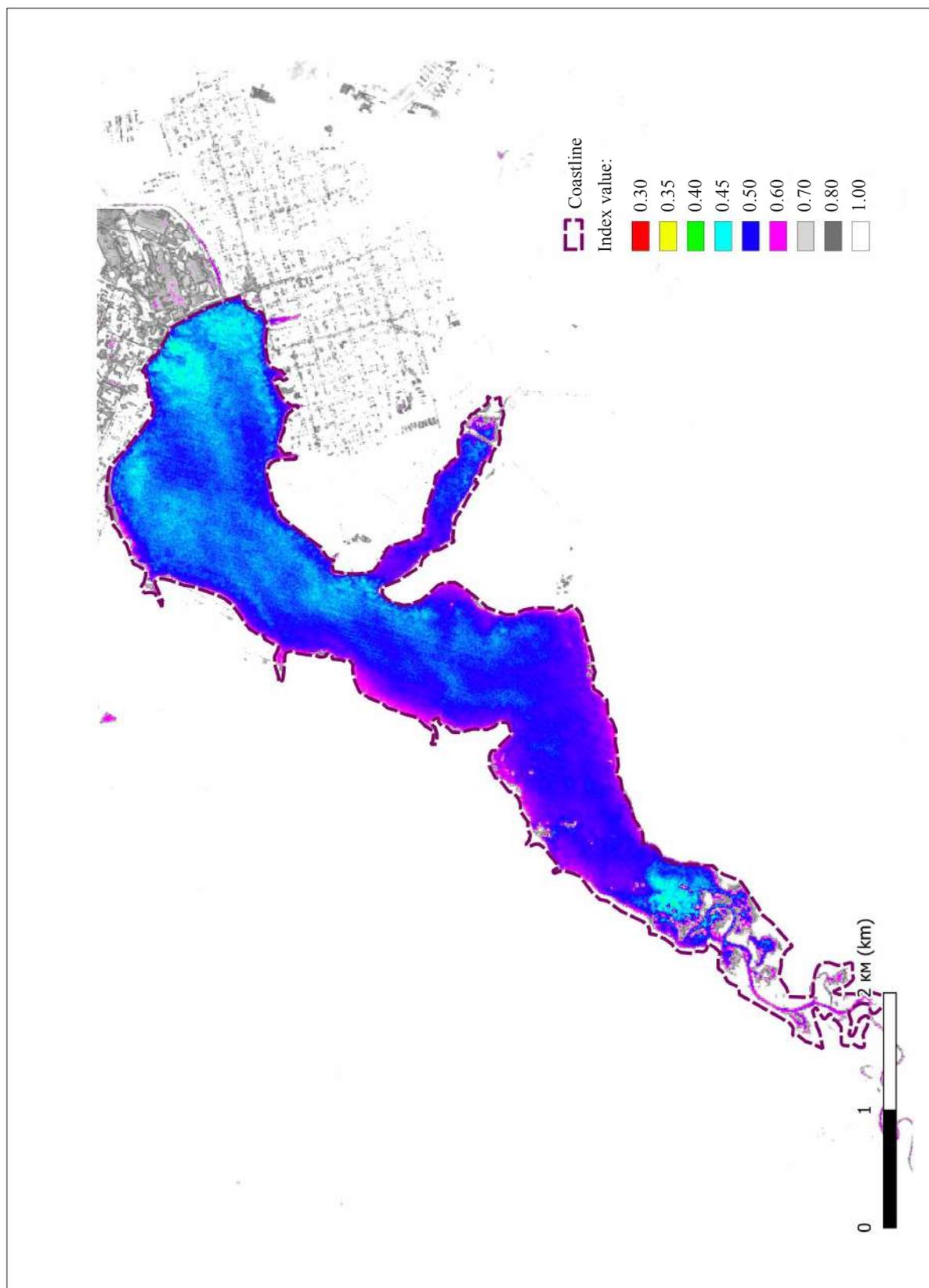


Fig. 2. Map of the Omutninskoye Reservoir based on the results of the NDAI calculation on 05.07.2021

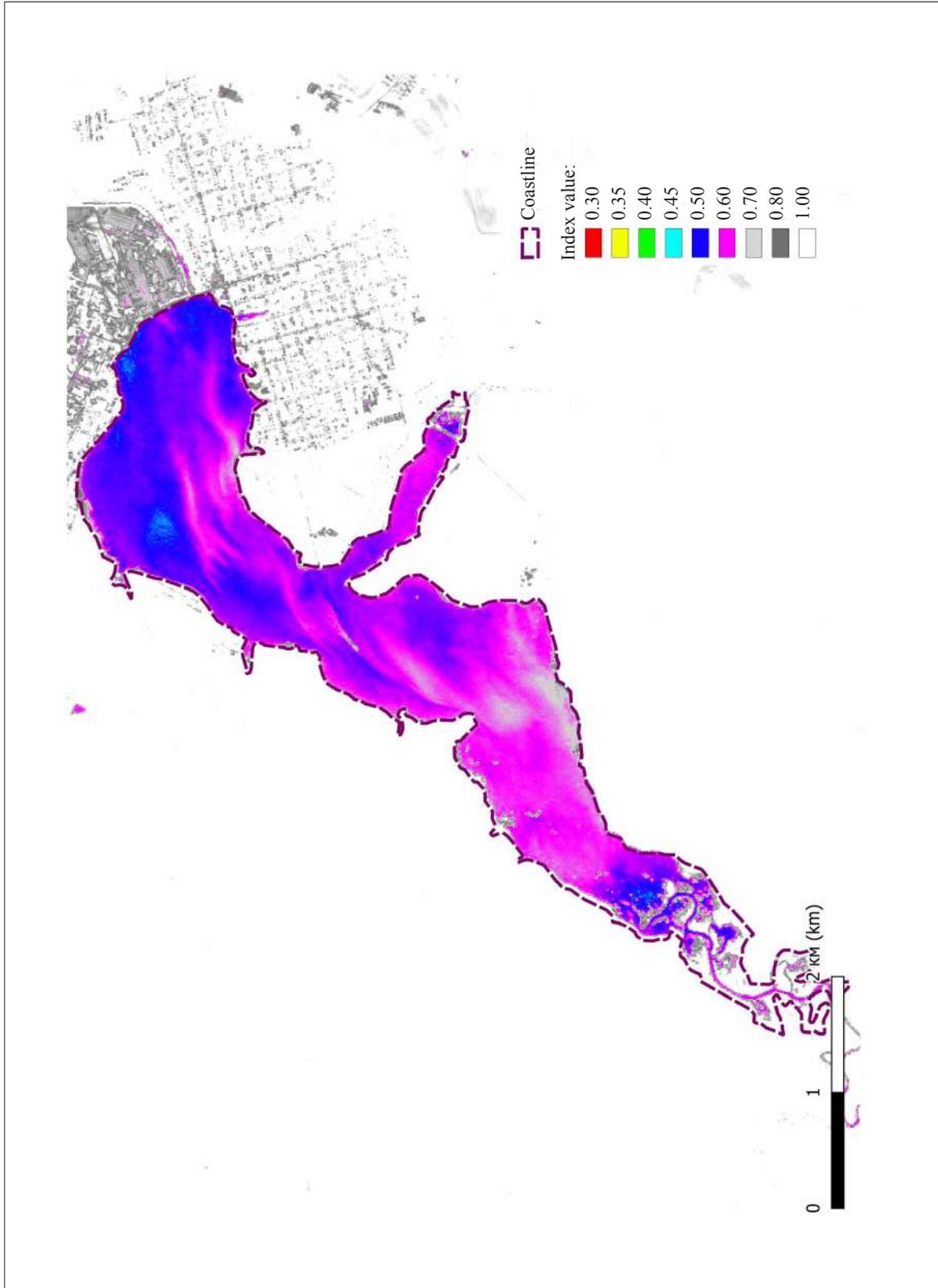


Fig. 3. Map of the Omutninskoye Reservoir based on the results of the NDAI calculation on 13.07.2021

presence of vegetation cover in the territory. In this study, positive NDVI values were recorded in areas covered with thickets of higher aquatic plants with leaves floating on the water surface, and in areas of mass development of phytoplankton. The largest range of NDVI values we observed in the Belokholunitskoye and Omutninskoye reservoirs in August and September, in the Bolshoye Kirsinskoye reservoir in July and August, and in the Chernokholunitskoye reservoir from June to August. The average value of NDVI in all water areas increased from May to July, and then decreased again. It indicates a more intensive development of phytoplankton in July compared to other months. A similar seasonal dynamics of phytoplankton development is also observed in other water bodies with increased anthropogenic load [21]. When comparing the results of calculating NDAI and NDVI, both indices are suitable for identifying areas of mass development of phytoplankton, but the normalized difference algoindex allows to get more detailed information, since it takes into account the brightness of the radiation of objects in four wavelength ranges, and the normalized difference vegetation index only in two. When comparing the calculations of two spectral indices with the data of field observations and the results of algological analysis, NDAI makes it possible to more accurately assess the degree of phytoplankton development under the dominance of CB in comparison with NDVI. However, if green algae dominate in phytoplankton, both indices are equally informative.

In the course of the study, we calculated another spectral index. It assesses the concentration of chlorophyll *a*, designated in this work as TBDO. The advantage of this index is the ability to assess the development of phytoplankton in highly productive turbid waters, which include the studied reservoirs of the Kirov region. According to the calculations, the TBDO value in the studied water areas varied within a fairly wide range: from -0.15 to 3.89. The value of the index differs significantly in different water areas and in different periods of time. When comparing the prevailing TBDO values in different reservoirs in the period from May to September, the smallest range of values is typical for the Chernokholunitskoye reservoir, a little more – for the Bolshoye Kirsinskoye reservoir. For the Omutninskoye and Belokholunskoye reservoirs, where intense water “blooming” was visually recorded, the range of TBDO values was significantly larger. When comparing the results of TBDO calculation with visual observations on reservoirs and

the results of algological analysis, this index is suitable for identifying phytoplankton accumulations in water areas, it allows comparing the degree of phytoplankton development in the four studied reservoirs.

The concentration of chlorophyll *a* in water is the most commonly used indicator for assessing the degree of development of phytoplankton in a water body. However, the degree of phytoplankton development can also be determined indirectly. For example, according to one of the main indicators of water quality – turbidity. It is known that during periods of intensive development of phytoplankton, as well as the formation of a large amount of detritus in the water of eutrophic reservoirs during the growing season of plants, the water turbidity increases [22]. In addition, the causes of increased turbidity of water may be the presence of clay, inorganic compounds (aluminum hydroxide, carbonates of various metals), colloids formed during the oxidation of iron and manganese compounds with atmospheric oxygen, organic impurities or living organisms, for example, bacterio-, phyto- or zooplankton [23]. Thus, the magnitude of turbidity can be used to judge both the quality of water in general and the degree of development of planktonic organisms in it. During the route inspection of reservoirs, we took water samples in different parts of the reservoirs for subsequent determination of turbidity in the laboratory using the turbidimetric method. Turbidity values ranged from 2 to 8 formazin turbidity units and more. In order to assess the turbidity of water in all water areas, the calculation of the NDTI was carried out according to satellite imagery. The values of the NDTI in the studied water areas varied from 0.16 to 0.52. The value of the NDTI at the beginning of the growing season (May–June) was quite high in all water areas. In July, we noted a slight decrease in the value of the NDTI in all the studied reservoirs. In August, an increase in the values of the NDTI was again noted in all water areas. It is known that water turbidity in the coastal areas of water bodies can increase during rains and floods [23]. Probably, these factors influenced the high values of turbidity in the water of the reservoirs in May and September. In the summer months, in addition to rains, the turbidity of the water could also be affected by the development of phytoplankton.

The spectral characteristics of water depend on many factors: the chemical composition of water, the nature of bottom sediments, the productivity of the reservoir, the presence of representatives of various divisions of algae

in the water. In order to take into account all these factors, it is necessary to calculate several spectral indices. The calculation of NDAI, NDVI, TBDO and NDTI in this article made it possible to take into account, when assessing the degree of phytoplankton development, such features of the reservoirs of the Kirov region as high color and turbidity of water, high content of organic substances. This became possible due to the use of various combinations of channels of the Sentinel-2 satellite in the calculations. The most informative index turned out to be NDAI. Its values do not depend on atmospheric interference and the influence of the reflection spectrum of the water itself [12]. The TBDO index was also quite informative. This index is recommended for determining the concentration of chlorophyll *a* in turbid productive waters. Calculation of TBDO made it possible to distinguish areas of mass development of phytoplankton from areas of increased water turbidity, in areas associated with the development of phytoplankton.

Conclusion

In order to identify areas of mass development of phytoplankton, we calculated four spectral indices and built a series of digital maps for the four largest reservoirs in the Kirov region. Based on the results obtained in the course of field and office work, we estimated the spatial distribution and temporal dynamics of phytoplankton development. It was noted that phytoplankton developed mainly in coastal shallow areas of reservoirs. The mass development of algae and cyanobacteria was most often observed in July and August. Intensive “blooming” of water was recorded in 2016, 2018, 2020 and 2021. The use of a complex of spectral indices made it possible to refine and supplement the data obtained during route observations on water bodies. Thus, digital maps built according to the calculation data of NDAI, NDVI, TBDO and NDTI can be used to assess the ecological state of the reservoirs of the Kirov region.

This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young scientists – PhDs (MK-5830.2021.1.5).

References

1. Binding C.E., Pizzolato L., Zeng C. EOLake-Watch; delivering a comprehensive suite of remote sensing algal bloom indices for enhanced monitoring of Canadian eutrophic lakes // *Ecological Indicators*. 2021. V. 124. Article No. 106999 [Internet resource] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20309389?via%3Dihub> (Accessed: 20.01.2022) (in Russian).
2. Chernetsky M.Yu., Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Sidko A.F. Estimation of phytoplankton blooming zones in the Krasnoyarsk reservoir based on AVHRR and MODIS satellite data // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2006. No. 2. P. 89–96 (in Russian).
3. Nikolaeva O.N., Romashova L.A., Volkova O.A. Application of ecological maps in monitoring the state of the environment // *Interexpo Geo-Siberia*. 2013. No. 2 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-ekologicheskikh-kart-v-monitoringe-sostoyaniya-okruzhayuschey-sredy> (Accessed: 17.03.2022) (in Russian).
4. Nas B., Karabork H., Ekercin S., Berktaay A. Mapping chlorophyll-*a* through *in situ* measurements and Terra ASTER satellite data // *Environ Monit Assess*. 2009. V. 157. P. 375–382. doi: 10.1007/s10661-008-0542-9
5. Antonenko M.V., Fedorova S.I. Application of a series of maps built according to long-term satellite imagery (using the NDVI index) to monitor the dynamics of the vegetation cover of estuaries in the Sea of Azov region // *Innovative Science*. 2016. No. 12–3 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-serii-kart-postroennyh-po-dannym-mnogoletney-sputnikovoy-smki-s-primeneniem-indeksa-ndvi-dlya-nablyudeniya-zadinamikoy> (Accessed: 18.03.2022) (in Russian).
6. Mishina A.E., Maksimova N.B. Analysis of the current state of water bodies on the example of Lake Manzherok of the Republic of Altai // *Proceedings of Young Scientists of the Altai State University*. 2020. No. 17. P. 30–33 (in Russian).
7. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. Satellite monitoring of the Krasnodar reservoir // *Geographic Bulletin*. 2017. No. 1 (40) [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/sputnikovyy-monitoring-krasnodarskogo-vodohranilisha> (Accessed: 18.03.2022) (in Russian).
8. Shekhirev A.A., Legacheva N.M. Dynamics of subaqual landscape of the Zeya reservoir // *Geography and environmental management of Siberia: collection of articles* / Ed. G. Ya. Baryshnikov. V. 27. Barnaul: Altayskiy universitet, 2020. P. 187–196 (in Russian).
9. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Spatial-temporal variability of the chlorophyll “a” concentration in the Krasnodar Reservoir according to the satellite images’ data // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 4. P. 67–84 (in Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2021-4-4
10. Saberioon M., Brom J., Nedbal V., Soucek P., Cisar P. Chlorophyll-*a* and total suspended solids retrieval and mapping using Sentinel-2A and machine learning for inland waters // *Ecological Indicators*. 2020. V. 113. Article No. 106236. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106236

11. Kut'yavina T.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V. Application of a complex of ground-based research methods for diagnosing pollution and processes of eutrophication of reservoirs in the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
12. Silkin K.Yu. Methodology for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on the materials of multi-zone remote sensing // *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*. 2012. No. 1. P. 220–223 (in Russian).
13. Rouse Jr.J., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *NASA Technical Reports Server*. 1974. P. 309–317 [Internet resource] <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf> (Accessed: 18.03.2022).
14. 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. 1. P. 457–469. doi: 10.23818/limn.38.26
15. Härmä P., Vepsäläinen J., Hannonen T., Pyhälähti T., Kämäri J., Kallio K., Eloheimo K., Koponen S. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland // *Science of the Total Environment*. 2001. V. 268. No. 1–3. P. 107–121. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00688-4
16. Protasov A.A., Barinova S., Novoselova T.N., Buseva Zh.F., Tomchenko O.V., Syl'aieva A.A., Lubskiy N.S., Semenchenko V.P., Sysova E.A. The heterogeneity of the abiotic and biotic components of techno-ecosystems: view from Space and from the Earth // *European Scientific Journal*. 2019. V. 15. No. 3. P. 423–448. doi: 10.19044/esj.2019.v15n3p423
17. Khaliullina L.Yu., Yakovlev V.A. Phytoplankton of shallow waters in the upper reaches of the Kuibyshev reservoir. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2015. 171 p. (in Russian).
18. Valalshchikov A.A., Silkin K.Yu., Kulnev V.V. Analysis of the ecological state of the Matyrskoe reservoir according to environmental, hydrochemical and satellite monitoring data // *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2014. No. 1. P. 110–117 (in Russian).
19. Belenok V.Yu., Derkach D.I., Rul N.V. Use of aerospace methods and image processing methods of remote sensing of the Earth for environmental monitoring of Kakhovka reservoir // *Astronomical School's Report*. V. 13. No. 1. P. 54–63 (in Ukrainian).
20. Kataev M.Yu., Bekerov A.A. Methodology of the water objects detection from multispectrum satellite measurements // *Proceedings of TUSUR University*. 2017. V. 20. No. 4 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-obnaruzheniya-vodnyh-obektov-pomnogospektralnym-sputnikovym-izmereniyam> (Accesses: 25.01.2022) (in Russian).
21. Tarasova N.G., Burkova T.N., Trokhimets O.O. Seasonal dynamics of phytoplankton and ecology of dominant algae species in ponds with varying degrees of anthropogenic load // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011. No. 5–1. P. 230–235 (in Russian).
22. Datsenko Yu.S. Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects. Moskva: Geos, 2007. 252 p. (in Russian).
23. GOST R 57164-2016. Drinking water. Methods for determining odor, taste and turbidity. Moskva: Standartinform, 2019. 17 p. (in Russian).

Maximum entropy modelling for predicting the potential distribution of methanogens in Sundarban mangrove ecosystem, India

© 2022. N. Das ORCID: 0000-0003-4081-2006*

A. Mondal ORCID: 0000-0001-6189-4165*

S. Mandal ORCID: 0000-0001-7014-557X*

Ecology and Environmental Modelling Laboratory,
Department of Environmental Science, The University of Burdwan,
Rajbati, Bardhaman, West Bengal, India, 713104,
e-mail: smandal@envsc.buruniv.ac.in

The production of methane (CH_4) by methanogens (*Mgen*) in mangrove sediments is known to contribute significantly to global warming. In such an estuarine environment, the abundance and population assemblage of *Mgen* are not well understood. Recently, there has been an increase of interest to understand about the properties of habitat distribution and the main environmental factors that influence mangrove suitability. Here, we used a maximum entropy (Maxent) species distribution model and a geographic information system (GIS) to determine the current habitat suitability distribution of *Mgen* in the Sundarban mangrove ecosystem in India. The Worldclim elevation (*elev*), precipitation (*precip*), solar radiation (*srad*), average temperature (t_{avg}), maximum temperature (t_{max}), minimum temperature (t_{min}), water vapor pressure (*vap*) and the wind speed (*wind*) data and 36 spatially well-dispersed species occurrence points were used to predict the potential distribution of *Mgen* in the 14,317 km² study area. The results indicated that *Mgen* has a high potential distribution at the deforested areas adjacent to the riverine system in the Indian Sundarban mangrove ecosystem. Jackknife test was used to evaluate the importance of the environmental variables for predictive modeling. The *precip* is the most important environmental variable which influences the distribution of *Mgen* in mangrove sediments. With an AUC (area under curve "Sensitivity vs. Specificity") of 0.826, the Maxent model was extremely accurate. The study shows that Maxent could be a useful tool for species rehabilitation and biodiversity conservation planning in the face of climate change.

Keywords: methane, entropy, maxent model, ecological niche.

УДК 579.266

Моделирование методом максимальной энтропии для прогнозирования потенциального распределения метаногенов в экосистеме мангровых зарослей Сундарбан в Индии

© 2022. Н. Дас, аспирант, А. Мондал, аспирант, С. Мандал, PhD, доцент,

Лаборатория экологии и экологического моделирования,
кафедра наук об окружающей среде, Университет Бурдван,
713104, Индия, Западная Бенгалия, Бардхаман, Раджбати,
e-mail: smandal@envsc.buruniv.ac.in

Известно, что производство метана (CH_4) метаногенами (*Mgen*) в опад мангровых зарослей вносит значительный вклад в глобальное потепление. В среде таких эстуариев численность и состав популяций *Mgen* изучены недостаточно. В последнее время возрос интерес к пониманию свойств распределения основных факторов окружающей среды, влияющих на пригодность мангровых зарослей для обитания метаногенов. В данном исследовании модель максимальной энтропии (Maxent) распространения видов и техника географической информационной системы (ГИС) были использованы, чтобы определить текущее распределение пригодности среды обитания *Mgen* в экосистеме мангровых зарослей Сундарбан в Индии. Для прогнозирования потенциального распространения видов *Mgen* на изучаемой территории площадью 14 317 км² были использованы сведения из базы данных Worldclim о высоте местности над уровнем моря (*elev*), количестве осадков (*precip*), солнечном излучении (*srad*), средней (t_{avg}), максимальной (t_{max}) и минимальной температуре воздуха (t_{min}), давлении водяного пара (*vap*), скорости ветра (*wind*), а также данные по 36 пространственно хорошо рассредоточенным местам обитания этих видов. Результаты показали, что *Mgen* имеют высокий потенциал распространения на обезлесенных территориях, прилегающих к речной системе в мангровой экосистеме Сундарбан в Индии. Для оценки значимости переменных окружающей среды для прогностического

моделирования использовался тест методом «складного ножа». Наиболее важным параметром окружающей среды, влияющим на распределение *Mgen* в опад мангровых зарослей, является количество осадков. При значении площади под кривой «специфичность–чувствительность» AUC = 0,826 модель Maxent оказалась чрезвычайно точной. Исследование показывает, что метод Maxent может быть полезным инструментом для планирования восстановления видов и сохранения биоразнообразия в условиях изменения климата.

Ключевые слова: метан, энтропия, модель максимальной энтропии, экологическая ниша.

Methane (CH₄) is the key gas produced in the anaerobic environments, which is the second most abundant greenhouse gas (GHG) associated with climate change [1]. In terms of GHG emissions, the CH₄ is approximately 25 times more effective than the CO₂ [2]. The source of global CH₄ emissions is unclear, but microbial processes in anoxic environments such as termites, natural wetlands, ocean, gas hydrates, paddy fields, ruminants, landfills, and sewage treatment lead to 69% of CH₄ emissions [3]. Wetlands are the world's largest natural source of CH₄ emission, contributing for around 25% of the global CH₄ budget [4], of which 50–60% is contributed by natural tropical wetlands [5].

Mangroves are typical example of mesophilic and moderately halophilic environmental niches [6]. Mangroves are one of the most productive habitats on the planet, providing a wide range of benefits to the society. The diverse microbial communities of mangroves play an important role in the cycling of nutrients in the environment [7]. The *Mgen* belong to the Euryarchaeota phylum of the Archaea domain which comprises six phylogenetically distinct orders, *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanocellales*, *Methanopyrales*, and *Methanosartinales*, as well as 33 genera based on 16S rRNA gene sequences [8]. The *Mgen* contains three major methanogenesis pathways: hydrogenotrophic, acetoclastic, and methylotrophic [3]. Across the river-bay spectrum, where continental freshwater meets oceanic water, methanogenic ecosystems are vulnerable to such stenohaline environment. It is crucial to point out major players involved in CH₄ production to understand the spatial and seasonal variability of *Mgen* in the river-bay system.

The drivers of *Mgen* from the mangrove beds are highly dynamic, which influences the emission process. So far, no such study on the distribution model of *Mgen* from mangrove system has been found under the huge body of literature. Therefore, the present work is probably a novel attempt to study the Maxent modeling of the *Mgen* distribution from the mangrove ecosystem. Predictive modeling of species spatial distributions based on environmental conditions

at established occurrence sites is a useful technique in analytical biology, with applications in conservation and reserve planning, ecology, invasive species management, and other fields [9]. The Maxent modeling was used to predict the current *Mgen* distributions in the Sundarban mangrove ecosystem using a comprehensive array of geo-referenced occurrence records and recent surveys to evaluate the properties of habitat distribution and environmental factors shaping habitat suitability.

Material and methods

Study sites. The study area is the Indian part of Sundarbans delta comprising blocks of the North and South 24 Parganas districts in the state of West Bengal. It lies between 21°27'06"N to 21°50'18"N latitude and 88°14'26"E to 88°53'05"E longitude. The Sundarbans are located in the Bay of Bengal, on the delta formed by the Ganges, Brahmaputra, and Meghna rivers. The total annual precipitation ranges from 1500 to 2000 mm. The seasonal minimum and maximum temperatures range from 12 to 24 °C and 25 to 35 °C, respectively [10]. All along the forests, land reclamation activities for hotels, resorts, and plantations, both agricultural and aquaculture, have sprouted. The dominant species among the halophytes are *Avicennia marina*, *A. alba*, *Porteresia coarctata*, *Exoecaria agallocha*, *Ceriops decandra*, *Acanthus ilicifolius* and *Derris trifoliata* [1].

Data sources of CH₄ emissions. The *Mgen* records were obtained from previously published literature in the Indian portion of the Sundarban mangrove ecosystem for this research. The last ten years presence only data of *Mgen* were collected from the authenticated research papers [11–18]. Google Earth was used to gather record coordinates for those data which were not collected through literature. Duplicate records were manually deleted, and records with apparent geocoding errors were discarded. Finally, the Sundarban mangrove ecosystem generated 36 *Mgen* distribution records.

Data sources of environmental variables. The most influential variables associated with

Mgen distribution were identified using eight environmental variables with a spatial resolution of 10 minutes (1 km), downloaded from the WorldClim dataset (Version 2.0, www.worldclim.org) [19].

The environmental variables such as elevation (m) (*elev*); precipitation (mm) (*precip*); solar radiation ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) (*srad*); average temperature ($^{\circ}\text{C}$) (*tavg*); maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$) (*tmax*); minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$) (*tmin*); water vapor pressure (kPa) (*vap*); and wind speed (m/s) (*wind*) were retained to simulate the current and future distributions of *Mgen* in Sundarban mangrove ecosystem. The spatial data layers for the model run were generated using ArcMap 10.3. The permutation importance and percent contribution are essential factors in determining the importance of environmental variables. The permutation value was based on the final output of the model rather than the direction taken in a single run.

Model description. In the information theory, entropy is a basic principle. Shanon [20] described entropy as “a measure of how much ‘choice’ is involved in the selection of an event”. As a result, a distribution with a higher entropy has more choices. The principle of the Maxent method is to ensure that approximation meets all constraints on unknown sites, which means that the approximate probability of an unknown distribution has less constraints but more choices [21]. The model can be defined by the following equation:

$$H(\hat{\pi}) = -\sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x),$$

whereas $H(\hat{\pi})$ – *Mgen* probability distribution, X – set of pixels in the study area, $\hat{\pi}(x)$ – non-negative probability to each point x .

Maxent (version 2.1) was used through <http://www.cs.princeton.edu> for scientific research. The training data consisted of 75% of the sample data, chosen at random. The test data consisted of the remaining 25% of the sample data. The regularization multiplier value was 0.1 to avoid over-fitting the test results [22]. The number of background points used here was restricted to 5,000. The goodness-of-fit of the model was measured using the area under the receiving operator curve (AUC). The model with the highest AUC was considered the best performer. The contributions of each variable to habitat model of *Mgen* were calculated using the jackknife test as built-in function of the software. The habitat suitability curves of each variable were calculated. The jackknife test

(systematically eliminating each variable) was used to decide the climatic variables were the most relevant in assessing potential distribution of species. Limiting factor mapping was also used to investigate how the climatic factors that have the greatest influence on predictions differ across the study region. The final potential species distribution map had a range of values from 0 to 1 that were regrouped into three potential habitat classes: high potential (0.62–1.00), moderate potential (0.23–0.61), and least potential (0.00–0.22).

Results and discussion

The habitat suitability curves for each environmental variable are shown in Figure 1 (see color insert III). The *Mgen* prediction accuracy was found to be “excellent” during the current period (AUC mean = 0.826) (Fig. 2a, see color insert IV). The results of the jackknife test revealed that the selected variables accurately represented the current *Mgen* distribution (Fig. 1j). According to model, prediction among the eight environmental variables, the *precip* contributes 46.3%, the *vap* contributes 29.5%, the *srad* contributes 9.3%, the t_{\min} contributes 7.4%, the *wind* contributes 4.3%, the *elev* contributes 1.7%, the t_{\max} contributes 0.8% and the t_{avg} contributes 0.7%. Considering the importance of permutation, the *precip* (74.8%) was much higher than others, and played a vital role in predicting the probable distribution of *Mgen*.

Microorganisms play a significant role in the global biogeochemical cycling of estuarine environments [23]. Several environmental variables and important factors influence *Mgen* population in estuarine sediments [24]. The spatial changes in sediment temperature were negligible in Sundarban, but the temporal changes are important. Despite the fact that the temperature was slightly lower during the monsoon than during the summer, methanogenesis was significantly higher. As a result, it can be said that seasonal temperature fluctuations have little impact on methanogenesis.

During the monsoon season (July–October), the tropical mangrove ecosystem receives more rainfall. The *Mgen* density peaked during the rainy season, and plunged by two orders of magnitude during the season [25]. Increased freshwater production during the rainy season provided favorable conditions for *Mgen* proliferation. The condition mobilizes mangrove sediment, which then releases the nutrient that acts as a substrate for the *Mgen* [26]. Thus, episodic rain has a significant impact on the *Mgen* population. The rate of CH_4 production was found to

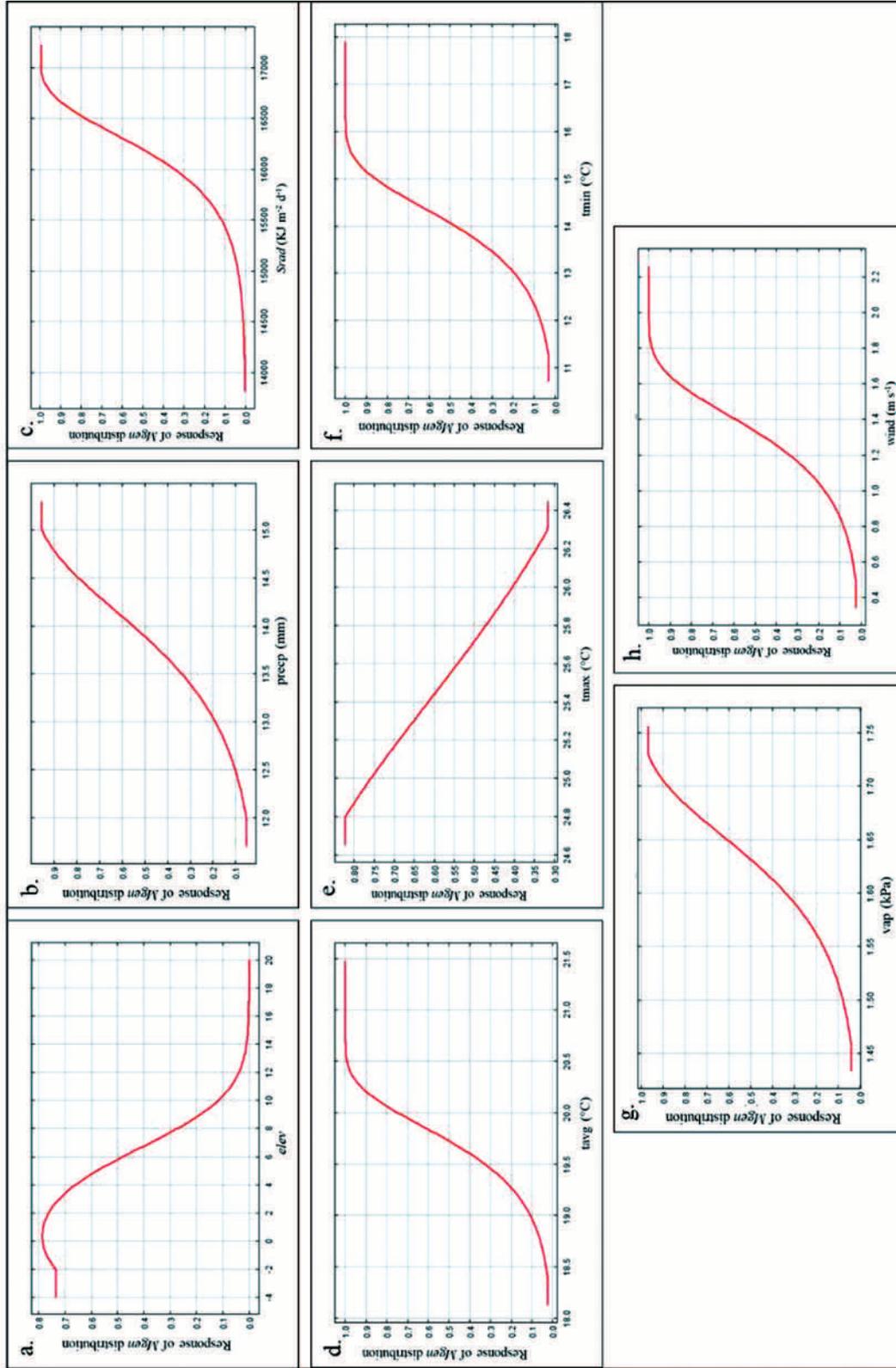


Fig. 1. Mgen's SDM response curves for significant environmental predictor variables. Mgen response curve for (a) *elev*, (b) *precip*, (c) *strad*, (d) t_{avg} , (e) t_{max} , (f) t_{min} , (g) *vap*, (h) *wind*

N. Das, A. Mondal, S. Mandal
“Maximum entropy modelling for predicting the potential distribution of methanogens in Sundarban mangrove ecosystem, India”. P. 42

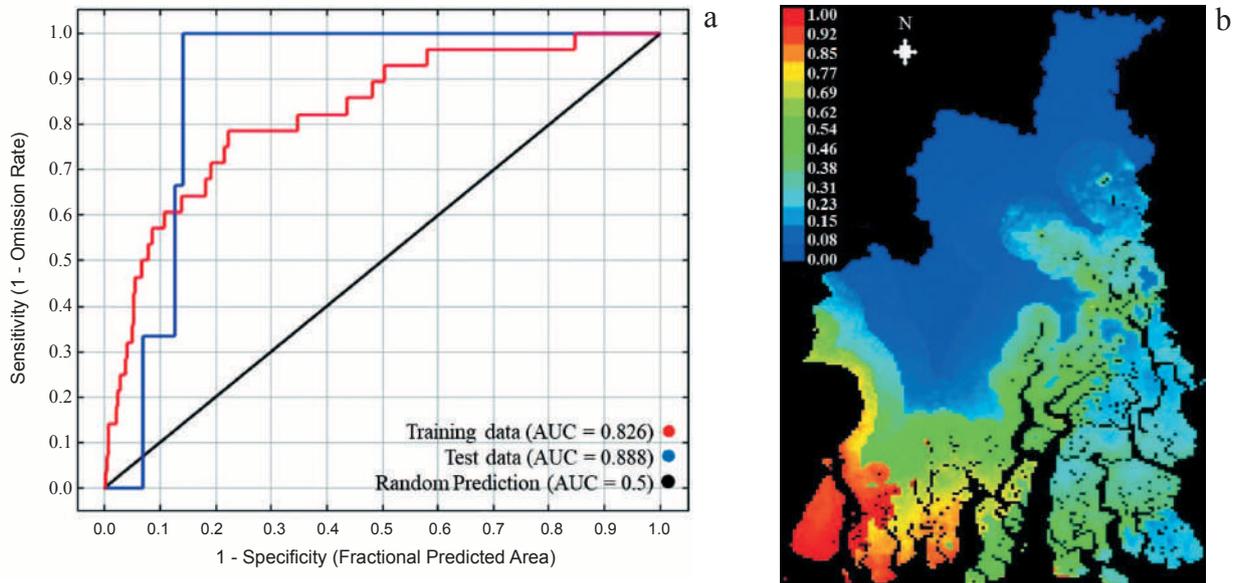


Fig. 2. Under the current time, the ROC curve and AUC value after 10 replicated runs (a) and Jackknife test of variable importance for *Mgen* distributions (b)

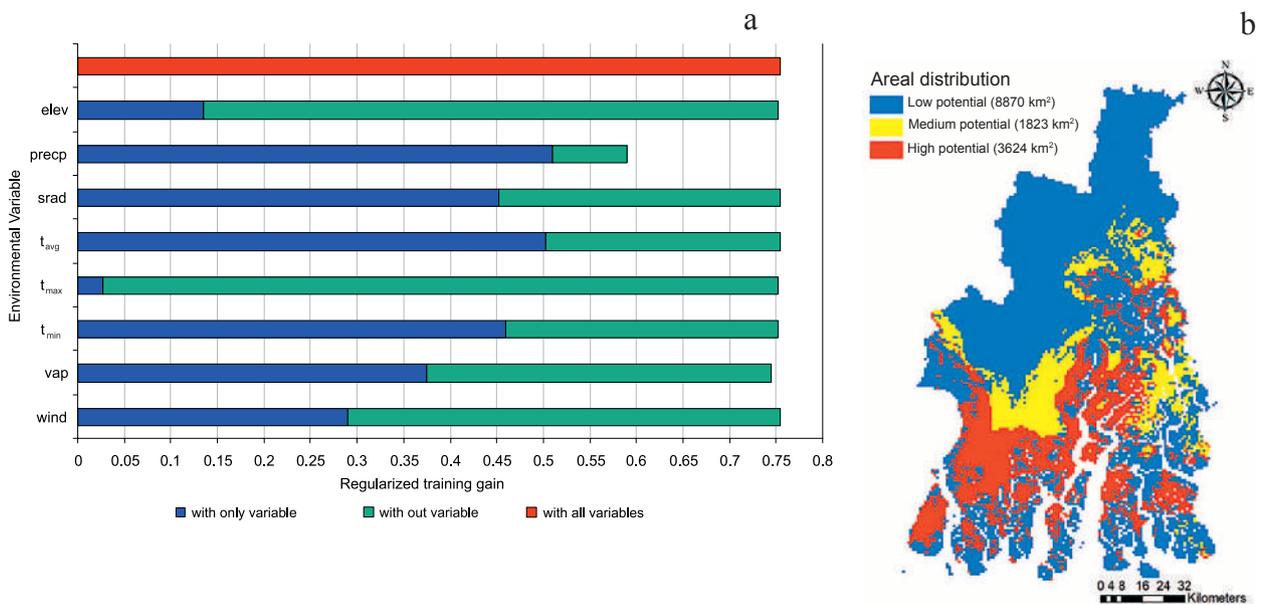


Fig. 3. Current suitable climatic distribution of *Mgen* in Sundarban mangrove ecosystem, India (a), Areal distribution of *Mgen* in Sundarban mangrove ecosystem, India (b)

be positively associated with the population of *Mgen*, suggesting that *Mgen* plays a significant role in CH₄ production [27]. *Mgen* abundance from hydrogen and acetate increased during the rainy season under low sulfate concentrations. Hydrogen contributes 33% methanogenesis when carbohydrates or related organic matter are degraded, making it essential in environments with high sedimentation rates (approximately 10 cm/yr) and organic carbon supplementation [28]. The recurrence of *Mgen* was most likely due to their ability to use a range of electron donors in an environment with a steady supply of organic matter from rivers and run-off from surrounding mangroves [29]. In both acidic and alkaline conditions, methanogenesis will occur [30]. It was corroborated that the existence of generalist groups within the methanogens vary with the change in estuarine conditions [31].

The potential distribution of *Mgen* based on observed occurrences and current environmental conditions projected by the Maxent model is shown in Figure 3a (see color insert IV). From the total 14,317 km² of distribution area, 3,624 km² was highly suitable, 1,823 km² was moderately suitable, and 8,870 km² was least suitable for *Mgen* distribution in the Sundarban mangrove ecosystem (Fig. 3b, see color insert IV). The results showed that the highly suitable habitats (where, the presence probability was greater than or equal to 62%) for *Mgen* were primarily located in coastal South-West and central part of Sundarban mangrove ecosystem, mainly including Kakdwip, Patharpratima, Sagar, Namkhana, Kulpi, Kultali, Mathurapur II, Basanti, Gosaba, Canning I block (administrative division of the district) and central middle part of Sundarban national park of South 24 Parganas.

The Maxent model predicted that different species will have different distributions of potentially suitable areas. Previously, it was claimed that the *Mgen* population benefited from a more favorable climate [32]. It was concluded that methanogenesis thrived in lower salinity environments, the concentration of *Mgen* in riverine sediments was significantly higher than in estuarine sediments [33]. Under current conditions, *Mgen* was more likely to be found in the south-west portion of the Sundarban mangrove ecosystem, along the Hooghly River and adjacent creeks. Polluted wetlands have higher *Mgen* distribution and CH₄ emission rates than unpolluted wetlands [34]. The Hooghly estuary is flanked by a large number of factories, which have been directly or indirectly emptying trade effluents, as well as domestic and waste-water

into the estuary, and this waste has been used by *Mgen* as a source of nutrients [35, 36]. Human activities, such as industrial and residential wastewater, discharge relatively high levels of nutrients into riverine sediments, which could serve as methanogenesis substrates [37]. The highly deforested and polluted administrative blocks of South 24 Parganas surrounding 3624 km² area of the Hooghly River such as Kakdwip, Patharpratima, Sagar, Namkhana, Kulpi, Kultali, Mathurapur II, Basanti, Gosaba, Canning I blocks and central-middle part of Sundarban national park has higher potential distribution of the *Mgen*. On the other hand, potentially distributed *Mgen* populations was found mostly in the central part of the Sundarban along the Malta estuary with 1,823 km² area including Mandirbazar, Jaynagar I, Jaynagar II and Mathurapur I blocks of South 24 Parganas and Basirhat I block of North 24 Parganas and upper part of the Sundarban national park. These areas were free from such industrial pollution, thus the distribution of *Mgen* was moderate. The population distribution of *Mgen* was low in mostly afforested part surrounding 8,870 km² area of the North and South 24 Parganas with less riverine systems except the high and moderately distributed blocks.

It was important to consider the impact of a global climate change scenario on *Mgen* distribution. Converting mangrove forest land into a cultivation area, where the methanogenesis and oxidation processes are in equilibrium, may increase net CH₄ emissions even further [38]. Anthropogenic activities that add more greenhouse gases in the future, especially from deforested areas, could affect the interaction between *Mgen* and methanotrophs. Mangroves that had not been disturbed released less CH₄ than crop fields and anthropogenically damaged mangrove forests, according to studies [39]. The mangrove forest conservation would help to preserve the CH₄ flux dynamics in a long-term way.

Conclusions

The sensitive environmental variable for *Mgen* distribution was considered to be precipitation (*precip*). Under the scenario of an urbanized deforested area surrounding the Hooghly River, the suitable habitat for *Mgen* tends to increase. The predicted spatial and temporal range trend of *Mgen* will be helpful in designing forest management and conservation strategies. Therefore, determining the causes of species distribution allows us to devise potential methods for preventing, slowing, or reversing negative patterns.

The authors acknowledge the Science and Engineering Research Board (SERB), New Delhi India (Project: EEQ/2018/001076) for providing financial support to carrying out this research work. The authors also thank the anonymous reviewers for providing the valuable comments to improve the manuscript.

References

- Mohan G.V., Rao K.K., Rao P.V.V. Environmental impact assessment of sediment quality analysis of Bhavanapadu mangrove ecosystem, East Coast of India // Asian Journal of Research in Chemistry. 2011. V. 4. No. 7. P. 1067–1072.
- Birch E.L. A review of “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability” and “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”. New York: Cambridge University Press, 2014. P. 184–185. doi: 10.1080/01944363.2014.954463
- Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // Environ Microbiol Rep. 2009. V. 1. No. 5. P. 285–292. doi: 10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x
- Wuebbles D.J., Hayhoe K. Atmospheric methane and global change // Earth-Sci. Rev. 2002. V. 57. No. 3–4. P. 177–210. doi: 10.1016/S0012-8252(01)00062-9
- Cao M., Marshall S., Gregson K. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model // J. Geophys. Res. Atmos. 1996. V. 101. No. D9. P. 14399–14414. doi: 10.1029/96JD00219
- Bhattacharyya A., Majumder N.S., Basak P., Mukherji S., Roy D., Nag S., Halder A., Chattopadhyay D., Mitra S., Bhattacharyya M., Ghosh A. Diversity and distribution of Archaea in the mangrove sediment of Sundarbans // Archaea. 2015. V. 2015. Article No. 968582. doi: 10.1155/2015/968582
- Lee S.Y., Primavera J.H., Dahdouh-Guebas F., McKee K., Bosire J.O., Cannicci S., Diele K., Fromard F., Koedam N., Marchand C., Mendelssohn I., Mukherjee N., Record S. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment // Glob. Ecol. Biogeogr. 2014. V. 23. No. 7. P. 726–743. doi: 10.1111/geb.12155
- Liu Y., Whitman W.B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic Archaea // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2008. V. 1125. No. 1. P. 171–189. doi: 10.1196/annals.1419.019
- Peterson A.T., Holt R.D. Niche differentiation in Mexican birds: using point occurrences to detect ecological innovation // Ecol. Lett. 2003. V. 6. No. 8. P. 774–782. doi: 10.1046/j.1461-0248.2003.00502.x
- Mandal S., Ray S., Ghosh P.B. Modelling of the contribution of dissolved inorganic nitrogen (DIN) from litterfall of adjacent mangrove forest to Hooghly–Matla estuary, India // Ecol Modell. 2009. V. 220. No. 21. P. 2988–3000. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.01.028
- Biswas H., Mukhopadhyay S.K., Sen S., Jana T.K. Spatial and temporal patterns of methane dynamics in the tropical mangrove dominated estuary, NE coast of Bay of Bengal, India // J Mar Syst. 2007. V. 68. No. 1–2. P. 55–64. doi: 10.1016/j.jmarsys.2006.11.001
- Chauhan R., Ramanathan A.L., Adhya T.K. Assessment of CH₄ and nitrous oxide flux from mangroves along Eastern coast of India // Geofluids. 2008. V. 8. No. 4. P. 321–332. doi: 10.1111/j.1468-8123.2008.00227.x
- Dutta M.K., Bianchi T.S., Mukhopadhyay S.K. Mangrove methane biogeochemistry in the Indian Sundarbans: A proposed budget // Front. Mar. Sci. 2017. V. 4. Article No. 187. doi: 10.3389/fmars.2017.00187
- Dutta M.K., Chowdhury C., Jana T.K., Mukhopadhyay S.K. Dynamics and exchange fluxes of methane in the estuarine mangrove environment of the Sundarbans, NE coast of India // Atmos. Environ. 2013. V. 77. P. 631–639. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.050
- Dutta M.K., Mukherjee R., Jana T.K., Mukhopadhyay S.K. Biogeochemical dynamics of exogenous methane in an estuary associated to a mangrove biosphere; The Sundarbans, NE coast of India // Mar. Chem. 2015. V. 170. P. 1–10. doi: 10.1016/j.marchem.2014.12.006
- Jha C.S., Rodda S.R., Thumaty K.C., Raha A.K., Dadhwal V.K. Eddy covariance based methane flux in Sundarbans mangroves, India // J. Earth Syst. Sci. 2014. V. 123. No. 5. P. 1089–1096. doi: 10.1007/s12040-014-0451-y
- Mukhopadhyay S.K., Biswas H., De T.K., Sen B.K., Sen S., Jana T.K. Impact of Sundarban mangrove biosphere on the carbon dioxide and methane mixing ratios at the NE Coast of Bay of Bengal, India // Atmos. Environ. 2002. V. 36. No. 4. P. 629–638. doi: 10.1016/S1352-2310(01)00521-0
- Padhy S.R., Bhattacharyya P., Dash P.K., Reddy C.S., Chakraborty A., Pathak H. Seasonal fluctuation in three mode of greenhouse gases emission in relation to soil labile carbon pools in degraded mangrove, Sundarban, India // Sci. Total Environ. 2020. V. 705. Article No. 135909. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135909
- Zhang L., Cao B., Bai C., Li G., Mao M. Predicting suitable cultivation regions of medicinal plants with Maxent modeling and fuzzy logics: a case study of *Scutellaria baicalensis* in China // Environ. Earth Sci. 2016. V. 75. No. 5. P. 1–2.
- Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell Syst. Tech. 1948. V. 27. P. 623–656.
- Jaynes E.T. Information theory and statistical mechanics // Phys. Rev. 1957. V. 106. P. 620–630. doi: 10.1103/PhysRev.106.62
- Phillips S.J., Dudík M., Schapire R.E. A maximum entropy approach to species distribution modeling // Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. 2004. P. 655–662 [Internet resource] http://rob.schapire.net/papers/maxent_icml.pdf (Accessed: 04.04.2022).
- Holguin G., Vazquez P., Bashan Y. The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and

- rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview // *Biol. Fertil. Soils*. 2001. V. 33. No. 4. P. 265–278. doi: 10.1007/s003740000319
24. Grünfeld S., Brix H. Methanogenesis and methane emissions: effects of water table, substrate type and presence of *Phragmites australis* // *Aquat. Bot.* 1999. V. 64. No. 1. P. 63–75. doi: 10.1016/S0304-3770(99)00010-8
25. Torres-Alvarado M.D., Fernández F.J., Ramírez Vives F., Varona-Cordero F. Dynamics of the methanogenic archaea in tropical estuarine sediments // *Archaea*. 2013. V. 2013. Article No. 582646. doi: 10.1155/2013/58264
26. Yang B., Gao X., Zhao J., Liu Y., Gao T., Lui H.K., Huang T.H., Chen C.T.A., Xing Q. The influence of summer hypoxia on sedimentary phosphorus biogeochemistry in a coastal scallop farming area, North Yellow Sea // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 759. Article No. 143486. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143486
27. Das N., Mandal S. Microbial populations regulate greenhouse gas emissions in Sundarban mangrove ecosystem, India // *Acta Ecologica Sinica*. 2021. doi: 10.1016/j.chnaes.2021.07.011
28. Zeleke J., Sheng Q., Wang J.G., Huang M.Y., Xia F., Wu J.H., Quan Z.X. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on the communities of methanogens and sulfate-reducing bacteria in estuarine marsh sediments // *Front Microbiol.* 2013. V. 4. Article No. 243. doi: 10.3389/fmicb.2013.00243
29. Winton R.S., Richardson C.J. The effects of organic matter amendments on greenhouse gas emissions from a mitigation wetland in Virginia's coastal plain // *Wetlands*. 2015. V. 35. No. 5. P. 969–979. doi: 10.1007/s13157-015-0674-y
30. Sorokin D.Y., Abbas B., Geleijnse M., Pimenov N.V., Sukhacheva M.V., van Loosdrecht M. Methanogenesis at extremely haloalkaline conditions in the soda lakes of Kulunda Steppe (Altai, Russia) // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2015. V. 91. No. 4. Article No. fiv016. doi: 10.1093/femsec/fiv016
31. Purdy K.J., Munson M.A., Cresswell-Maynard T., Nedwell D.B., Embley T.M., Use of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes to investigate function and phylogeny of sulphate-reducing bacteria and methanogenic archaea in a UK estuary // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2003. V. 44. No. 3. P. 361–371. doi: 10.1016/S0168-6496(03)00078-3
32. Zepp Falz K., Holliger C., Großkopf R., Liesack W., Nozhevnikova A.N., Muller B., Wehrli B., Hahn D. Vertical distribution of methanogens in the anoxic sediment of Rotsee (Switzerland) // *Appl. Environ. Microbiol.* 1999. V. 65. No. 6. P. 2402–2408. doi: 10.1128/aem.65.6.2402-2408.1999
33. Pattnaik P., Mishra S.R., Bharati K., Mohanty S.R., Sethunathan N., Adhya T.K. Influence of salinity on methanogenesis and associated microflora in tropical rice soils // *Microbiol. Res.* 2000. V. 155. No. 3. P. 215–220. doi: 10.1016/S0944-5013(00)80035-X
34. Das N., Mondal A., Mandal S. Polluted waters of the reclaimed islands of Indian Sundarban promote more greenhouse gas emissions from mangrove ecosystem // *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2022. V. 36. P. 1277–1288. doi: 10.1007/s00477-021-02135-5
35. Basu A.K., Ghosh B.B. Observations on diurnal variations in some selected stretch of the hooghly estuary (India) // *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. 1970. V. 32. No. 1. P. 271–283. doi: 10.1007/BF02502407
36. Zhou Z., Chen J., Cao H., Han P., Gu J.D. Analysis of methane-producing and metabolizing archaeal and bacterial communities in sediments of the northern South China Sea and coastal Mai Po Nature Reserve revealed by PCR amplification of *mcrA* and *pmoA* genes // *Front Microbiol.* 2015. V. 5. Article No. 789. doi: 10.3389/fmicb.2014.00789
37. Liu X., Pan J., Liu Y., Li M., Gu J.D. Diversity and distribution of Archaea in global estuarine ecosystems // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 637. P. 349–358. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.016
38. Cameron C., Hutley L.B., Friess D.A. Estimating the full greenhouse gas emissions offset potential and profile between rehabilitating and established mangroves // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 665. P. 419–431. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.104
39. Arai H., Yoshioka R., Hanazawa S., Minh V.Q., Tuan V.Q., Tinh T.K., Phu T.Q., Jha C.S., Rodda S.R., Dadhwal V.K., Mano M., Inubushi K. Function of the methanogenic community in mangrove soils as influenced by the chemical properties of the hydrosphere // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2016. V. 62. No. 2. P. 150–163.

Загрязнение почвенного покрова соединениями металлов, мышьяка и сурьмы в районе воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса

© 2022. Д. Г. Сычева, магистрант,
 Н. Е. Кошелева, д. г. н., профессор,
 И. В. Тимофеев, к. г. н., н. с.,
 Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
 119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,
 e-mail: l.msu@yandex.ru

Актуальность исследования обусловлена значительным объёмом токсичных выбросов от теплоэлектростанций (ТЭС), работающих на бурых углях, которые способны осаждаться из атмосферы и накапливаться в городских почвах. Для оценки воздействия выбросов ТЭС на загрязнение почв г. Гусиноозёрска (Республика Бурятия) из верхнего (0–10 см) слоя по регулярной сетке отобраны образцы. Методом ICP-MS и ICP-AES проанализировано содержание Zn, As, Cd, Bi, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Ag в 79 пробах почв, а также в бурых углях и золе Гусиноозёрской Государственной районной электростанции (ГРЭС), выбросы которой являются основным источником загрязнения. Концентрации Mo, W, Sr, Zn, V в бурых углях в 1,5–2,9 раза превышают кларки в углях мира, зола обогащена Mo, Sr, V, Cu, Co. Способность почв сорбировать тяжёлые металлы, As и Sb определяется их физико-химическими свойствами: слабощелочной реакцией среды, среднесуглинистым гранулометрическим составом и средним содержанием органического вещества (2,7%). Наиболее загрязнены почвы в промышленной и одноэтажной жилой зонах. В первой аккумулируются Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb, которые связаны с выбросами ГРЭС и влиянием угольной пыли. Во второй накапливаются Sb, Cu, Sr, Zn, Ag, Cd, Pb, поступающие в почвы с золой-уносом ГРЭС, бытовым мусором и выбросами автотранспорта. Тяжёлые металлы, As и Sb образуют в почвенном покрове несколько локальных техногенных аномалий высокой и средней контрастности, которые занимают 7% площади города.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, мышьяк, сурьма, городские почвы, экогеохимия, теплоэлектростанция, бурый уголь, зола-унос.

Contamination of soil cover with compounds of metals, arsenic and antimony in the area of impact of fuel and energy complex

© 2022. D. G. Sycheva ORCID: 0000-0001-8952-5820
 N. E. Kosheleva ORCID: 0000-0002-7107-5718
 I. V. Timofeev ORCID: 0000-0001-8817-1231
 Lomonosov Moscow State University,
 1, Leninskiye Gory St., Moscow, Russia, 119991,
 e-mail: l.msu@yandex.ru

The relevance of the study is caused by a significant amount of toxic emissions from thermal power plants (TPPs) operating on brown coal, which can precipitate from the atmosphere and accumulate in urban soils. To assess the impact of TPP emissions on soil pollution in the city of Gusinoozyorsk (Republic of Buryatia), samples were taken from the upper (0–10 cm) horizons on a regular grid. With the help of the ICP-MS and ICP-AES methods the content of Zn, As, Cd, Bi, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Ag were analyzed in 79 soil samples, as well as in brown coal and ash of Gusinoozyorsk TPP, whose emissions are the main source of pollution. Brown coals contain concentrations of Mo, W, Sr, Zn, V 1.5–2.9 times higher than the clarkes for coals of the world. Ash is enriched with Mo, Sr, V, Cu, Co compared to world clarkes. The ability of soils to adsorb heavy metals, arsenic and antimony is determined by their physicochemical properties: a slightly alkaline reaction, a medium loamy texture and an average content of organic matter (2.7%). The soils of the industrial operating and one-storey residential land use subzones are the most contaminated. In the first zone Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb accumulate which are associated with emissions from the Gusinoozyorsk TPP and the influence of coal dust. In the second zone Sb, Cu, Sr, Zn, Ag, Cd, Pb accumulate which enter the soils with fly ash from the TPP, household waste and car emissions. Heavy metals and metalloids in the soil cover have formed several local anthropogenic anomalies of high and moderate contrast, which occupy 7% of the city's area.

Keywords: heavy metals, metalloids, urban soils, environmental geochemistry, thermal power plant, brown coal, fly ash.

Изучению влияния промышленных объектов и автотранспорта на городскую среду уделяется всё большее внимание. Особой опасности подвергается здоровье людей, проживающих в городах с мощным топливно-энергетическим комплексом, работающим на буром угле, поскольку большинство теплоэлектростанций (ТЭС) размещаются в черте города. Наибольшая концентрация вредных веществ приходится на зону в радиусе до 3 км [4], однако уровень воздействия выбросов на компоненты ландшафтов сильно варьирует в зависимости от технических характеристик ТЭС, топлива, розы ветров, рельефа и других физико-географических факторов. С пылегазовыми выбросами ТЭС в окружающую среду поступают соединения токсичных тяжёлых металлов и неметаллов (ТМН), представляющие значительную экологическую опасность [2]. Депонирующей средой для них выступают верхние горизонты городских почв; интенсивность их накопления зависит от физико-химических свойств почвенных горизонтов и ландшафтных условий.

Данная проблема актуальна для России и всего мира. Изучение химического состава золашлакоотвалов бурых углей Канско-Ачинского месторождения свидетельствует о концентрации в золе В, Мо, As, Ge, Be, Pb, Zn, Sn, W [3]. Зола ТЭС «Никола Тесла» (Сербия) обогащена Mg, Al, Mn, As, Zn, Cr и другими ТМН, негативно влияющими на здоровье людей [4]. Влияние золы-уноса ТЭС в городах Костолац (Сербия) и Гацко (Босния и Герцеговина) проявилось в загрязнении почв Ni, Cu и Cr [5]. Бурые угли, используемые на теплоэлектроцентрали (ТЭС) г. Улан-Батор (Монголия), обогащены в десятки раз по сравнению с кларками Pb, As, Mo, а также Cu, Sr, Cd и Ni [6].

Цель работы – на основе данных геохимической съёмки оценить эколого-геохимическое состояние почвенного покрова г. Гусиноозёрска в Республике Бурятия, где расположена крупнейшая в регионе Государственная районная электростанция (ГРЭС). В качестве топлива на ней используются бурые угли местных Загустайского, Баин-Зухерского, а также Окино-Ключевского месторождения, находящегося в 154 км к юго-востоку от Гусиноозёрской ГРЭС. Электрическая мощность станции составляет 1190 МВт, в 2021 г. ГРЭС выработала 3668,1 млн кВт·ч электроэнергии.

Объект и методы исследования

Город Гусиноозёрск расположен в Гусиноозёрской межгорной котловине, на

северо-восточном берегу оз. Гусиное, которое используется как пруд-охладитель ГРЭС. Территория относится к зоне каштановых почв сухой степи, Тувинско-Южно-Забайкальской провинции. В почвенном покрове доминируют каштановые почвы в сочетании с лугово-каштановыми, лугово-болотными и луговыми [7]. В городе распространены антропогенно-трансформированные урбо-каштановые почвы. Сильно преобразованные почвы образуют группу урбанозёмов, профиль которых включает один или несколько горизонтов урбик [8]. На территории города выделены пять функциональных зон: промышленная действующая и недействующая, селитебные с много- и малоэтажной застройкой, малоиспользуемые территории (пустыри).

Промышленный топливно-энергетический узел состоит из Гусиноозёрской ГРЭС, угольных шахт и транспортных предприятий с железнодорожной станцией Загустай. Недействующая промзона представляет собой обширную территорию с недостроенными или закрывшимися предприятиями, среди которых радиозавод, кирпичный завод, завод по обработке металлических изделий, а также Гусиноозёрское буроугольное месторождение на юге города. Сюда загрязняющие вещества поступают в основном с продуктами разрушения зданий и других строительных конструкций, поэтому загрязнение почв имеет реликтовый характер.

Верхний (0–10 см) слой почв города опробовался летом 2019 г. по регулярной сетке с шагом 500–600 м согласно методике [9]. Фоновые почвы, развитые в сходных ландшафтных условиях, но вдали от техногенных источников загрязнения, опробованы в 2–2,5 км к западу и северо-западу от города. Всего отобрано 79 проб почв, включая 7 фоновых.

Физико-химические свойства почв, влияющие на их сорбционную способность, определяли в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ: рН водной вытяжки – потенциометрическим методом, гранулометрический состав – на лазерном гранулометре (Fritsch, Германия), содержание органического углерода ($C_{орг}$) – методом Тюрина. Валовое содержание ТМН в пробах почв, угля и золы ГРЭС определяли масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой в ИПТМ РАН. Для подробного анализа выбрано 15 элементов: Zn, As, Cd, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Bi и Ag.

Особенности микроэлементного состава бурых углей и золы Гусиноозёрской ГРЭС выявлялись путём сравнения с мировыми кларками [10]. Содержание ТМН в фоновых почвах C_{ϕ} сравнивали с кларками K_1 верхней части континентальной коры [11], а также с региональным средним значением K_2 для Центральной Бурятии [12] путём расчёта кларков концентрации $KK = C_{\phi}/K_{1(2)}$ при $C_{\phi} \geq K_{1(2)}$ или рассеяния $KP = K_{1(2)}/C_{\phi}$ при $C_{\phi} < K_{1(2)}$. Интенсивность накопления ТМН в городских почвах разных функциональных зон оценивалась с помощью коэффициентов концентрации относительно фоновых почв: $K_c = C_i/C_{\phi}$ при $C_i \geq C_{\phi}$ или рассеяния $K_p = C_{\phi}/C_i$ при $C_i < C_{\phi}$, где C_i – содержание ТМН в городских образцах, мг/кг. Полиэлементное загрязнение почвенного покрова определялось по суммарному показателю: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где n – число ТМН с $K_c > 1$, который имеет пять уровней: низкий ($Z_c < 16$), средний (16–32), высокий (32–64), очень высокий (64–128) и максимальный (> 128) [13].

Коэффициенты экологической опасности $K_o = C_i/\text{ПДК(ОДК)}$ вычислялись для V, As, Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Sb, у которых существуют утверждённые предельно допустимые (ПДК) или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) в почвах (СанПиН 1.2.3685-21).

Для описания пространственной структуры загрязнения почв составлены карты распределения элементов-приоритетных загряз-

нителей и суммарного показателя Z_c в пакете ArcGIS 10.1 методом сплайн-интерполяции.

Результаты и обсуждение

Содержание ТМН в буром угле и золе. Угли, сжигаемые на Гусиноозёрской ГРЭС, обогащены $\text{Mo}_{2,9}\text{W}_{2,3}\text{Sr}_{2,0}\text{Zn}_{1,9}\text{V}_{1,5}$ (нижний индекс – величина KK) относительно кларков в углях [10]. В отобранной с фильтра золе ГРЭС по сравнению с углём в 1,7–8,4 раза выше содержание всех ТМН, кроме As, который выбрасывается в воздух в основном в парообразном состоянии [14]. Наиболее сильно концентрируются $\text{V}_{8,4}\text{Sr}_{6,4}\text{Mo}_{6,0}$ (табл. 1). Относительно глобальных кларков зола ГРЭС обогащена $\text{Mo}_{2,5}\text{Sr}_{2,1}\text{V}_{2,0}\text{Cu}_{1,3}\text{Co}_{1,2}$ и значительно обеднена $\text{Bi}^{21,5}\text{As}^{15,0}\text{Sb}^{7,1}$ (верхний индекс – величина KP).

Для выяснения дальнейшей судьбы элементов-примесей при сжигании углей рассчитано их теоретическое содержание в золе, равное отношению содержания элемента в углях к их зольности, равной 20–21%. По сравнению с рассчитанными значениями Sr, Zn, Ag, Cu, Pb, Cd, As, Sb в золе имеют более низкую концентрацию, что свидетельствует об их конденсации на аэрозолях и рассеивании с дымовыми газами.

Физико-химические свойства верхних горизонтов почв. Фоновые почвы имеют нейтральную реакцию среды, супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав.

Таблица 1 / Table 1

Геохимические характеристики углей и золы Гусиноозёрской ГРЭС и фоновых почв
Geochemical characteristics of coals and ash of the Gusinoozyorsk TPP and background soils

Показатель, мг/кг Indicator, mg/kg	Sr	Zn	Cu	V	Cr	Pb	Co	Mo	Sb	Bi	As	Ni	W	Ag	Cd
Среднее в угле ГРЭС Mean for coal of TPP	241	35	15	33	10	7,4	4,0	6,3	0,4	0,12	6,5	9,2	2,8	0,036	0,09
Среднее в золе ГРЭС Mean for ash of TPP	1545	82	96	277	59	23	31	38	0,7	0,2	3,2	53	5,3	0,2	0,2
Кларк бурых углей [12] Clarke for brown coal	120	18	15	22	15	6,6	4,2	2,2	0,8	0,8	7,6	9	1,2	0,09	0,2
Кларк золы [12] Clarke for coal ash	740	110	74	140	82	38	26	15	5,0	4,3	48	52	6,0	0,6	1,1
Фоновые почвы Background soils	259	80	12	41	21	27	5,7	2,6	0,7	0,3	4,9	13	3,1	0,01	0,2
Кларк верхней части земной коры [8] Upper Earth's crust Clarke	270	75	27	106	92	17	15	1,1	0,8	0,2	5,6	50	2	0,05	0,1
Региональное среднее [1] Regional mean	300	70	15	60	40	20	10	1	–	–	2	20	–	0,01	1
KK в фоновых почвах KK in background soils	–	1,1	–	–	–	1,4	–	2,6	–	–	2,5	–	–	1	–
KP	1,2	–	1,3	1,5	1,9	–	1,8	–	–	–	–	1,5	–	–	5

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические свойства верхнего (0–10 см) слоя почв Гусиноозёрска (средние значения, в скобках – пределы колебаний) / Physicochemical properties of the topsoils (0–10 cm) in the city of Gusinoozyorsk (average values, in brackets – minimum and maximum values)

Функциональная зона (число проб) Land use zone (number of samples)	Содержание физической глины, % Physical clay content, %	pH	Удельная электро- проводность, мкСм/см Specific conductivity, μS/cm	C _{орг.} , % Organic carbon, %
Промышленная действующая (8) Industrial operating (8)	29 (16–47)	7,6 (4,5–8,6)	766 (137–990)	2,7 (1,1–4,3)
Промышленная недействующая (4) Industrial inactive (4)	31 (18–39)	8,1 (7,7–8,7)	295 (178–411)	3,0 (1,8–4,4)
Селитебная многоэтажная (7) Multi-storey residential (7)	31 (23–48)	8,4 (8,1–8,7)	257 (112–448)	1,8 (1,0–2,6)
Селитебная одноэтажная (19) One-storey residential (19)	27 (19–39)	8,0 (7,0–9,1)	527 (95–2320)	4,3 (1,1–7,5)
Пустыри (27) Wasteland (27)	32 (19–56)	8,2 (6,2–10,4)	671 (58–4880)	2,6 (0,9–6,0)
Постагрогенная (5) Post-agrogenic (5)	22 (13–46)	8,2 (7,0–8,9)	595 (95–906)	3,6 (1,9–5,4)
Среднее по городу (79) Mean over the city (79)	30 (13–56)	8,1 (4,5–10,4)	676 (58–7920)	2,7 (0,9–6,0)
Фоновая территория (7) Background area (7)	26 (16–30)	7,3 (6,7–8,9)	192 (121–292)	2,0 (0,6–3,4)

Среднее содержание C_{орг.} в верхних горизонтах составляет 2,0%, удельная электропроводность водной вытяжки (ЕС) – 192 мкСм/см (табл. 2).

Почвы Гусиноозёрска разнообразны по гранулометрическому составу, содержание физической глины составило 13–56%. Реакция среды в верхних горизонтах изменяется от слабощелочной в промышленной действующей зоне до щелочной в селитебной многоэтажной, что связано с осаждением строительной пыли и растворением содержащихся в почве обломков бетона, черепицы и кирпича [15]. Повышенные значения pH в почвах промышленной недействующей зоны обусловлены поступлением карбонатной пыли, образующейся при выветривании разрушенных зданий. Наиболее низкое значение (pH 4,5) выявлено на юге города вблизи терриконов Гусиноозёрского бурогоугольного разреза, что можно объяснить окислением сульфидов железа и других металлов, присутствующих в углеродсодержащих отвалах, и их переходом в подвижные оксидные и водорастворимые сульфатные формы [1].

Электропроводность почвенного раствора превышает значения фона в 3,5 раза, что указывает на засоление. Наибольшее значение ЕС (7920 мкСм/см) обнаружены на пойме р. Загустай, к которой примыкают отвалы вскрышных пород Загустайского месторождения. Русло

частично перекрыто материалом отвалов, из-за чего поток воды перераспределяется по пойме, заболачивая её и привнося большое количество солей [16]. Максимальное содержание C_{орг.} (до 7,5%) приурочено к селитебной одноэтажной зоне, что связано с внесением органических удобрений на приусадебных участках. В зоне одноэтажной застройки содержание C_{орг.} минимально (1–2,6%) – здесь отсутствуют зелёные насаждения и почва слабо задернована.

Таким образом, техногенная трансформация городских почв усиливает их фиксирующую способность по отношению к ТМН. Они могут закрепляться на щелочном геохимическом барьере в результате аккумуляции сульфатных форм ТМН, поступающих из отвалов Гусиноозёрского бурогоугольного разреза. Повышенное содержание физической глины усиливает роль сорбционного барьера в накоплении ТМН, а органическое вещество связывает халькофильные Cu, Pb, Cd, формируя органоминеральный барьер [17].

Содержание ТМН в фоновых и городских почвах. В верхнем слое фоновых почв относительно кларков верхней части континентальной коры накапливаются Mo_{2,4}, Cd_{2,0}, Pb_{1,6}, W_{1,6}, Bi_{1,5} и рассеиваются Ag^{5,0}, Cr^{4,4}, Ni^{3,8}, V^{2,6}, Co^{2,6}, Cu^{2,3}, содержание Sb, Bi, Sr и Zn близко к кларкам. По сравнению с региональным фоном почвы обогащены

Mo_{2,6}As_{2,5}Pb_{1,4}, концентрации Zn и Ag имеют околочларковские значения, а содержание остальных ТМН ниже регионального фона.

В почвах Гусиноозёрска содержание Cu, Ag, As, Sr, Co, Ni, V, Sb, Mo, Cr, Zn, Pb превышает фоновые значения, но значения K_c, как правило, меньше 2. Наибольшим накоплением отличаются Sr_{2,2}Cu_{1,7}As_{1,6}, которые поступают в почвы с выбросами летучей золы от Гусиноозёрской ГРЭС (рис. 1). Наиболее сильно загрязнены почвы промышленной действующей

зона и селитебной зоны одноэтажной застройки, которые находятся под техногенным воздействием уже многие десятилетия. Почвы селитебной зоны многоэтажной застройки загрязнены минимально – коэффициенты накопления K_c ≤ 1,6 для всех элементов.

В промышленной действующей зоне аккумулируются Cu_{2,4}Ag_{2,1}As_{2,0}Sr_{1,9}Co_{1,7}V_{1,6}Ni_{1,6}Sb_{1,6}, что связано с выбросами ГРЭС и угольной пыли, разносимой с поверхности открытого углекислого на территории ГРЭС.

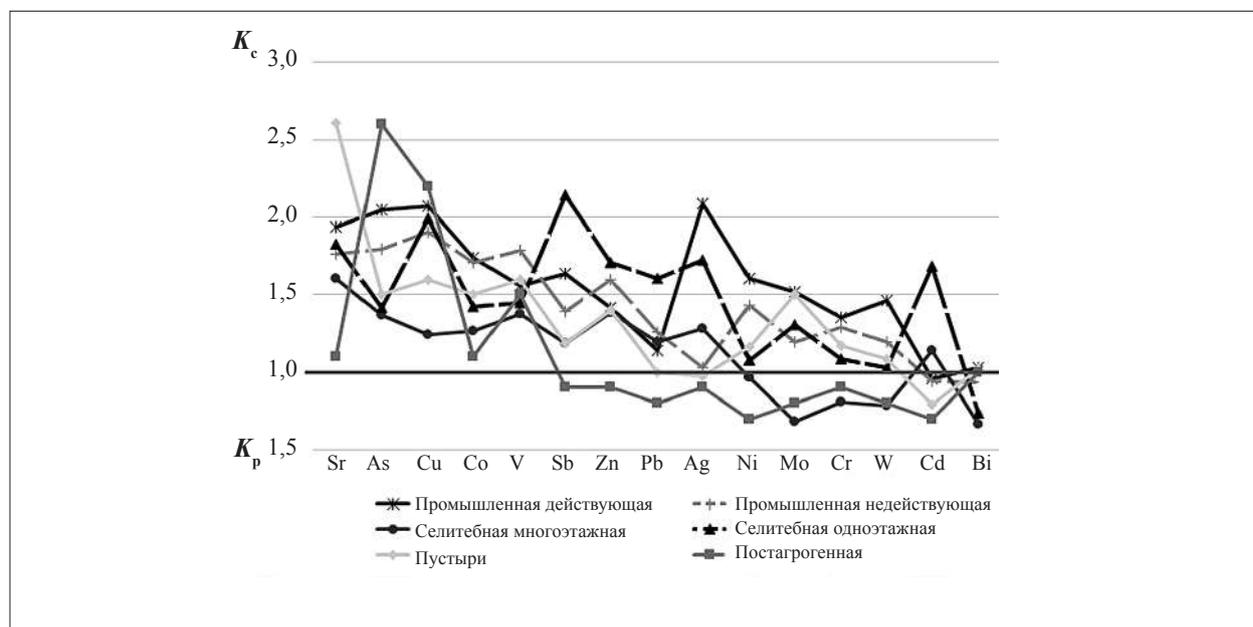


Рис. 1. Геохимические спектры почв в функциональных зонах Гусиноозёрска
 Fig. 1. Geochemical spectra of soils in the land use zones of the city of Gusinoozersk

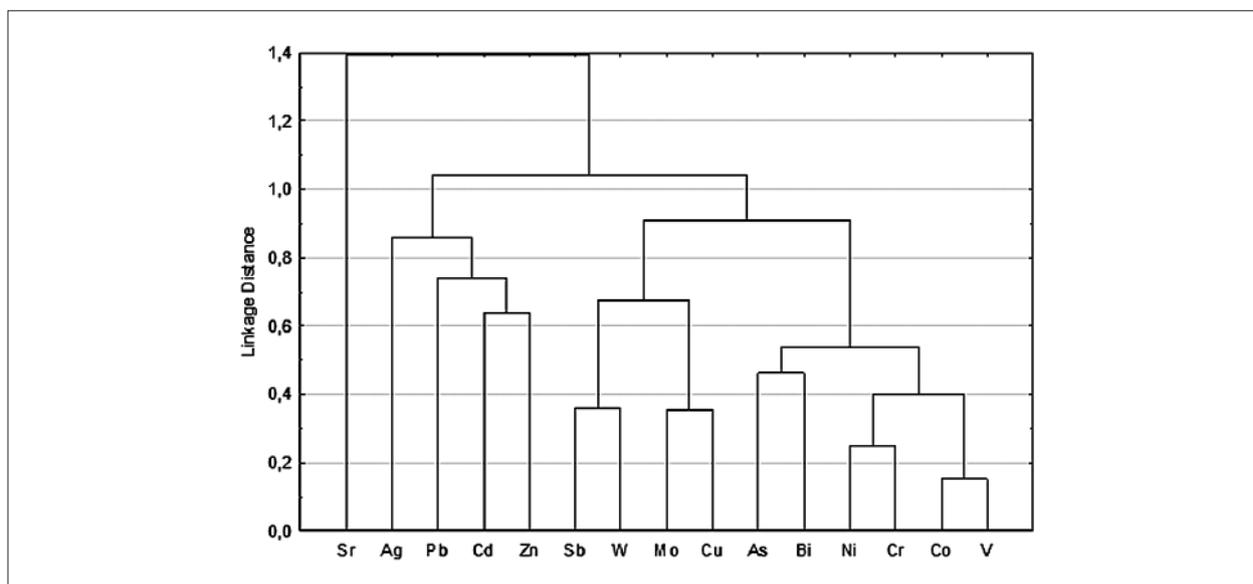


Рис. 2. Парагенетические ассоциации ТМН в верхнем слое почв Гусиноозёрска (алгоритм complete linkage, мера сходства d = 1 – Pearson’s r)
 Fig. 2. Paragenetic associations of heavy metals, arsenic and antimony in the topsoils of the city of Gusinoozersk (amalgamation rule: complete linkage, distance measure: d = 1 – Pearson’s r)

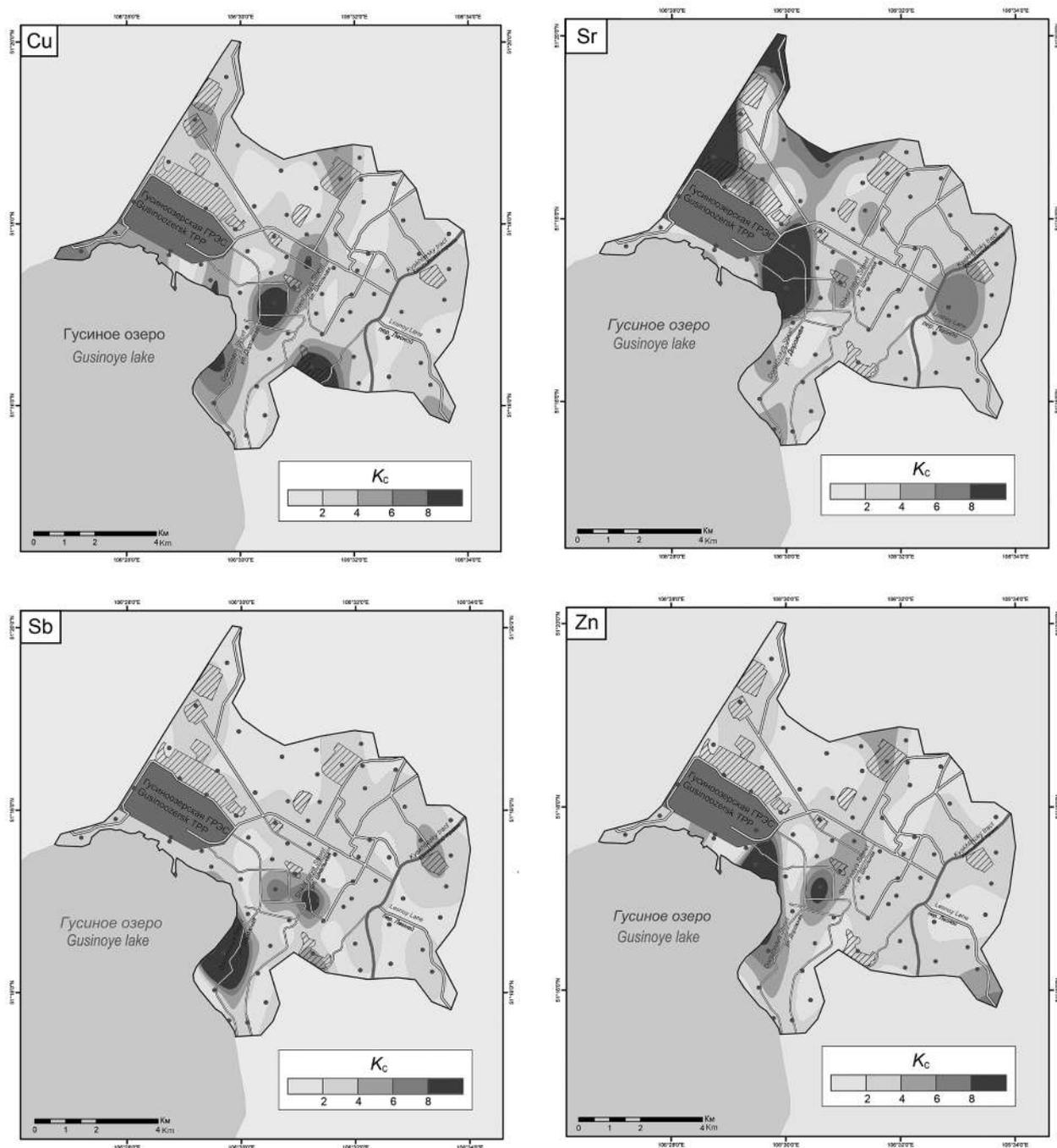


Рис. 3. Распределение Cu, Sr, Sb и Zn в верхнем слое почв г. Гусинозёрска
 Fig. 3. Distribution of Cu, Sr, Sb, and Zn in the topsoils of the city of Gusinoozёрsk

В жилой зоне одноэтажной застройки наибольшее накопление отмечено у $Sb_{2,1}Cu_{2,0}Sr_{1,8}Zn_{1,7}Ag_{1,7}Cd_{1,7}Pb_{1,6}$. Источниками этих элементов могут быть летучая зола ГРЭС, бытовые отходы, а также продукты эксплуатации автотранспорта: в выхлопных газах содержатся Pb, Cu, Sr; в моторном масле – Zn, Pb, Cu, Sb, Mo; при истирании шин в окружающую среду поступают Cd, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Cu, Sb; при истирании тормозных колодок – Cu, Sb, Zn, Pb и др. [9, 13, 18].

Ассоциации ТМН в городских почвах. Для выделения парагенетических ассоциаций ТМН, поступающих в почву из общих техногенных источников и обнаруживающих сходные тенденции к миграции и аккумуляции в различных ландшафтно-геохимических условиях, в пакете STATISTICA 10 проведён кластерный анализ (рис. 2). В верхних горизонтах почв выделены три ассоциации: две полиэлементных V-Co-Cr-Ni, Cu-Mo-W-Sb и пара Zn-Cd.

Первая ассоциация с наиболее сильными корреляционными связями ($r = 0,46-0,84$) включает ТМН, поступающие в основном из природно-техногенных источников, это продукты разрушения строительных материалов природного происхождения и выдуваемые частицы почвы. Менее тесные корреляционные связи внутри ассоциации Cu-Mo-W-Sb ($r = 0,33-0,64$) обусловлены разными источниками этих элементов: выбросами автотранспорта, золой-уносом ГРЭС и бытовыми отходами. Zn-Cd ($r = 0,36$) поставляют в основном автотранспорт, дополнительное влияние оказывают другие локальные источники.

Техногенные аномалии ТМН. Анализ геохимических карт Гусиноозёрска (рис. 3) показал, что отдельные ТМН образуют локальные полиэлементные аномалии высокой контрастности. В центральной части города с усадебной застройкой обнаружены аномалии $Sb_{13}Mo_6Cd_4Cu_4W_{3,6}Co_{2,5}V_{2,2}$ на ул. Мичурина и $Cu_6Zn_5Sb_{3,6}Pb_{2,7}$ на ул. Рабочая, которые, вероятно, обусловлены свалками бытовых отходов [16]. Ещё одна аномалия $Mo_{17}Cu_6W_3Pb_{2,7}Sb_{2,4}As_{2,4}$ сформировалась на юге города, где катионогенные Cu, W, Pb и Sb выносятся из отвала кислых вскрышных пород Гусиноозёрской угольной шахты и накапливаются на щелочном барьере в днище балки.

На северо-западе города, вблизи кирпичного завода, в верхнем слое почв выявлена аккумуляция $As_{4,4}Co_{3,2}V_{2,4}W_{2,1}$, на северо-востоке – $Ni_{2,2}Sb_{2,2}Cr_{2,1}V_{2,1}W_{2,0}Co_{2,0}$, что можно объяснить сжиганием бурого угля при печном отоплении и воздействием выбросов автотранспорта [9, 13, 18]. На западе города, рядом со станцией очистки сточных вод, повышено содержание $As_{2,8}Ag_{2,2}Cu_{1,9}Sb_{1,8}$. Очистные сооружения не полностью удаляют металлы из стоков, воды на выходе, как правило, обогащены Ag, Cu, Cr и другими ТМН [9, 14].

Оценка экологической опасности загрязнения городских почв ТМН. Уровень загрязнения верхнего слоя городских почв в среднем низкий ($Z_c = 8$). Большая часть (57%) территории (почти вся селитебная многоэтажная, постагрогенная и значительная часть зоны пустырей) имеет минимальный уровень загрязнения ($Z_c < 8$). Низкое загрязнение ($Z_c = 8-16$) выявлено на 36% территории в промышленной и жилой одноэтажной зонах (рис. 4). На 4% городской территории – в частном секторе на ул. Рабочая и на пойме р. Загустай – уровень загрязнения почв ТМН средний, на 3% – на ул. Мичурина и вблизи отвала Гусиноозёрского месторождения – опасный.

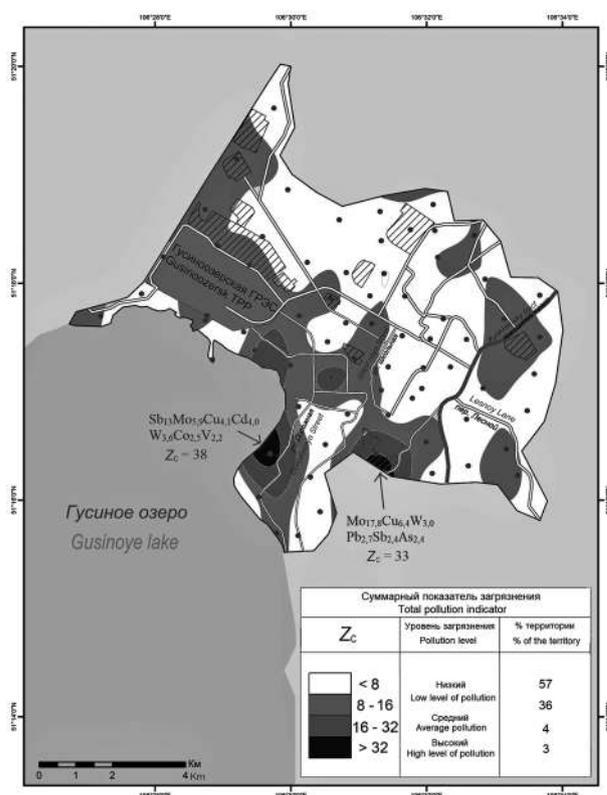


Рис. 4. Суммарное загрязнение ТМН почвенного покрова г. Гусиноозёрска
Fig. 4. Total contamination with heavy metals, arsenic and antimony of the soil cover in the city of Gusinoozyorsk

Полиэлементное загрязнение почв уменьшается в ряду функциональных зон: промышленная действующая (средний $Z_c = 10,2$) > селитебная с одноэтажной застройкой (9,2) > промышленная недействующая (8,1) > пустыри (7,9) > селитебная с многоэтажной застройкой (5,0) > постагрогенная (4,7). Эта последовательность отражает уровень техногенной нагрузки, который определяется концентрацией элемента в выбросах и длительностью воздействия на почву.

Сравнение содержания отдельных ТМН в почвах Гусиноозёрска с ПДК и ОДК показало, что для всей территории города характерна низкая степень опасности загрязнения. Наибольшую опасность представляет As, превышение норматива которого в 1,2–3,7 раза обнаружено на 17% территории города с максимальным превышением в зоне пустырей. Для Zn, Pb и Sb ОДК/ПДК превышено на 1–4% площади. Загрязнение почв V, Cd, Ni и Cu отсутствует.

Заключение

Исследование состава бурых углей Загустайского, Баин-Зухерского и Окино-

Ключевского месторождений показало, что по сравнению с кларками углей они обогащены Mo, W, Sr, Zn, V. В золе Гусиноозёрской ГРЭС наибольшие концентрации обнаружены у Mo, Sr, V, Cu. Сжигание бурого угля на Гусиноозёрской ГРЭС и в частном секторе при печном отоплении приводит к накоплению в городских почвах Sr, Cu, As. Значительное влияние на загрязнение почв оказывают выбросы автотранспорта и локально – свалки бытовых отходов. Наибольшее загрязнение Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb почв обнаружено в промышленной действующей зоне Гусиноозёрска.

В почвенном покрове сформировались несколько полиэлементных аномалий ТМН высокой и средней контрастности, которые занимают 7% площади города. Однако 93% городской территории характеризуется минимальным и низким уровнями загрязнения. Случаи нарушения санитарно-гигиенических нормативов Zn, Pb и Sb единичны, за исключением As, норматив которого превышен в 1,2–3,7 раза на 17% территории города.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Полевые и лабораторные работы проведены при поддержке РФФИ (проект № 17-29-05055-офи_м, обработка данных – при поддержке НИР по разработке интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал (договор № 8/Д-2021 от 14.12.2021).

References

1. Kasimov N.S. Ekogeochemistry of landscapes. Moskva: IP Filimonov M.V., 2013. 208 p. (in Russian).
2. Verma S., Masto R., Gautam S., Choudhury D., Ram L., Maiti S., Maity S. Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant // Fuel. 2015. V. 162. P. 138–147. doi: 10.3390/min8020054
3. Ogorodnikova E.N., Baraboshkina T.A., Nikolaeva S.K. Features of the mineral composition ash dump – products technogenesis // Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2011. No. 3. P. 20–24 (in Russian).
4. Popovic A., Relic D., Djordjevic D. Trace and major elements in ash of “Nikola Tesla A” power plant (III) – associations of elements in passive cassette ash // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2015. V. 37. No. 14. P. 1487–1494. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.007
5. Savic D., Nisic D., Malic N., Dragosavljevic Z., Medenica D. Research on power plant ash impact on the quality of soil in Kostolac and Gacko coal basins // Minerals. 2018. V. 8. No. 2. P. 54–70. doi: 10.1080/15567036.2011.615804
6. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Sorokina O.I., Gulin P.D., Bazha S.N., Enkh-Amgalan S. Geochemistry of Ulaanbaatar landscapes // Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. 2013. No. 5. P. 109–124 (in Russian). doi: 10.15356/0373-2444-2013-5-109-124
7. Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Badmayev N.B., Gyninova A.B., Ubugunov V.L., Balsanova L.D. Soils of Buryatia: diversity, taxonomy and classification // Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyajstvennoy akademii im. V.R. Filippova. 2012. V. 2. P. 45–52 (in Russian).
8. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.Y., Prokofeva T.V. Anthropogenic soils (genesis, geography, remediation) / Ed. G.V. Dobrovolskiy. Moskva: Oykumena, 2003. 266 p. (in Russian).
9. Demetriades A., Birke M. Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p. doi: 10.1016/j.gexplo.2017.10.024
10. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Toxic and potentially toxic elements of fossil coals. Ekaterinburg: PH UrO RAS, 2005. 655 p. (in Russian).
11. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5, geogr. 2015. No. 2. P. 7–17 (in Russian).
12. Belogolovov V.F. Geochemical atlas of Ulan-Ude. Ulan-Ude: Buryat. kn. izd-vo, 1989. 52 p. (in Russian).
13. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Geochemistry of the landscapes in Eastern Moscow. Moskva: APR, 2016. 320 p. (in Russian).
14. Environmental geochemistry / Eds. Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin, R.S. Smirnova, I.L. Basharkevich, T.L. Onischenko, L.N. Pavlova, N.Ya. Trefilova, A.I. Achkasov, S.Sh. Sarkisyan. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).
15. Greinert A., Fruzińska R., Kostecki J. Urban soils in Zielona Góra // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 31–54.
16. Voloshin A.L. Causes and some aspects of the present decrease in the water content of the rivers of Western Transbaikalia // Proc. of the IX Intern. conf. “Rivers of Siberia and the Far East”. Ulan-Ude, 2015. P. 124–128 (in Russian).
17. 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: 10.7868/S0032180X15050032
18. Hulskotte J.H.J., Roskam G.D., Denier van der Gon H.A.C. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors // Atmospheric Environment. 2014. V. 99. P. 436–445. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.007

Зообентос и зоопланктон предгорных озёр Приполярного Урала

© 2022. О. А. Лоскутова, к. б. н., с. н. с., О. Н. Кононова, к. б. н., н. с.,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: loskutova@ib.komisc.ru

В статье приведены данные о составе, структуре и количественном развитии сообществ водных беспозвоночных небольших предгорных озёр Приполярного Урала. Озёра расположены на территории национального парка «Югыд ва» в труднодоступной местности, они сохраняют естественный режим. В зоопланктоне определено 55 таксонов. В составе планктонных фаун всех водоёмов преобладали ветвистоусые раки. Относительно высокие показатели численности и биомассы зоопланктона обусловлены доминированием в сообществах низших раков. Фауна и количественное развитие донных беспозвоночных большинства озёр не богаты. Установлено, что состав зообентоса включает 24 таксономических группы гидробионтов. Основу численности и биомассы зообентоса составляли хирономиды, олигохеты, амфиподы и пиявки. Максимальной численностью организмов характеризовались илистые грунты, наименьшей – мелкие заиленные валуны, однако биомасса бентоса на каменистых биотопах была наибольшей. Особенностью исследованных озёр является обитание в них личинок стрекоз.

Ключевые слова: западный склон Урала, водные экосистемы, озёра, фауна, беспозвоночные.

Zoobenthos and zooplankton of the foothill lakes of Subpolar Urals

© 2022. O. A. Loskutova ORCID: 0000-0002-9059-2745,
O. N. Kononova ORCID: 0000-0002-7320-4034,
Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: loskutova@ib.komisc.ru

The article presents data on composition, structure and quantitative parameters of aquatic invertebrates from four small foothill lakes at the Subpolar Urals. The lakes are located in the “Yugyd va” national park in remote swampy areas. 55 zooplankton taxa were revealed: Rotifera 22, Cladocera 22 and Copepoda 11. All species are common species of plankton animals of the Russian European Northeast. In each lake, 28–34 taxa were registered with the prevalence of cladocerans. Quantitative parameters of zooplankton varied significantly, averaging 70.6–143.9 thousand ind./m³, and 0.5–16.4 g/m³ in deep lakes and 23.7 thousand ind./m³, and 0.4 g/m³ – in shallow lakes. The prevalence of crustacean plankton against rotifer plankton both in species composition and quantitatively distinguishes these lakes from the majority of those surveyed in this area. Species diversity and quantitative parameters of benthic invertebrates’ assemblages are poor in the most lakes under study. Zoobenthos includes 23 taxonomic groups of hydrobionts. In each lake, we found 13 to 21 groups of benthos. The highest taxonomic diversity was found in a shallow flowing lake. During late June – early July, the abundance of zoobenthos ranged from 1.4 to 5.2 thousand ind./m², and was significantly higher in August (43.6 thousand ind./m²) due to the occurrence of juvenile insects. The most abundant groups are chironomids, oligochaetes, amphipods and nematodes. Biomass ranged from 2.2 to 5.5 g/m², and mainly included chironomids, oligochaetes, amphipods and leeches. Silty grounds were characterized by highest density. Benthic biomass was maximal in the gravel habitats. A feature of the bottom population of the studied lakes is the habitation of dragonfly larvae. Zooplankton and zoobenthos of the studied lakes are distinguished from water bodies located in the Maliy Patok river basin, located upstream the Schugor River, by higher species richness and quantitative parameters.

Keywords: western slopes of the Urals, aquatic ecosystems, lakes, fauna, invertebrates.

Экосистемы озёр являются жизненно важными ресурсами для водных организмов и человека. Любое изменение качества окружающей среды вызывает самые разные

экологические последствия [1–3]. Сообщества беспозвоночных озёр, расположенных на охраняемых территориях, являются удобными объектами для выявления тенденции измене-

ния климата при проведении мониторинга. Однако, фауна этих водоёмов остаётся недостаточно изученной, хотя для понимания изменения климатических процессов важно детальное изучение именно региональной фауны. Известно лишь несколько работ по зоопланктону и зообентосу горных и предгорных озёр западного склона Приполярного Урала [4–6].

Река Большой Паток – один из наиболее крупных правых притоков р. Щугор (бассейн р. Печора) длиной 121 км, берёт начало на западных склонах Приполярного Урала. В бассейне р. Большой Паток находится 96 озёр общей площадью 415 га [7]. Цель нашей работы – изучить состав, структуру и количественное развитие сообществ водных беспозвоночных озёр в бассейне р. Большой Паток. Исследованные нами озёра расположены на территории национального парка «Югыд ва» в труднодоступной болотистой местности. Водная растительность озёр хорошо развита, характерны заросли кубышки, рдестов, вахты трёхлистной. Грунты в прибрежье представлены заиленными песками либо валунами со мхом, центральная часть озёр занята мощными отложениями ила.

Материалы и методы исследований

Обследованы четыре предгорных озера в бассейне р. Большой Паток (табл. 1). Всего собрано и обработано 13 проб зоопланктона и 26 проб зообентоса. Зоопланктон отбирали посредством фильтрации 50 л воды через планктонную сеть Апштейна с размером ячеи 80 мкм. При отборе проб бентоса с мягких грунтов использовали облегчённый дночерпатель Петерсена, с валунных и валунно-галечных – гидробиологический скребок с длиной лезвия 30 см. Промывали пробы, используя мельничный газ с размером ячеи 158 мкм. После отбора пробы фиксировали 4% раствором формалина и обрабатывали в лаборатории по стандартным методикам [4, 8].

Все виды, найденные в пробах зоопланктона, независимо от их экологических характеристик [9], относили к планктонным. Неполовозрелые формы веслоногих раков учитывали как отдельные таксоны. Индивидуальный вес организмов зоопланктона рассчитывали по формулам [8]. В анализе полученных результатов использовали коэффициент общности видового состава Съёренсена (I_s) и индекс доминирования Паляя – Ковнацки (D_i) [10].

Таблица 1 / Table 1

Характеристика обследованных озёр в бассейне р. Большой Паток
Characteristics of the surveyed lakes in the Bolshoy Patok River basin

Название озера Lake name	Координаты* и дата отбора проб Coordinates*, sampling date	Высота,* м над уровнем моря height above sea level	Площадь*, га Area, ga	Максимальная глубина*, м Maximum depth, m	Температура воды, °C Water temperature, °C
Озеро в низовьях р. Седью (Плотвичное) Lake in the lower reaches of the Sed'yu River (Plotvichnoe)	64°36'50"N 58°52'00"E 10.07.2009	163,8	7,8	18	19,1
Озеро в низовьях р. Потэмью Lake in the lower reaches of the Potem'yu River	64 ° 36'10"N 59°01'35"E 19.06.2010	167,2	2,8	7,7	10,2
Озеро Сиговое Lake Sigovoe	64°35'15"N 58°58'10"E 21.06.2012	161,2	16,8	20	21,3–21,6
Озеро Малое Окунёвое Lake Maloye Okunevovoe	64°33'50"N 58°55'40"E 12.08.2017	159,6	4	3	14,0

Примечание / Note: * – данные по [9] / the data are taken from [9].

Таблица 2 / Table 2

Видовой состав зоопланктона исследованных озёр
Species composition of zooplankton in the studied lakes

Таксон Taxon	Плотвичное Plotvichnoye	Сиговое Sigovoye	Малое Окунёвое Maloye Okunevoye
Copepoda			
Nauplius	+	+	+
Copepodit Cyclopoida	+	+	+
Copepodit Calanoida	+	–	–
<i>Eudiaptomus graciloides</i> (Lilljeborg)	+	–	–
<i>Macrocylops albidus</i> (Jurine)	–	–	+
<i>M. fuscus</i> (Jurine)	–	+	–
<i>Eucyclops (Eucyclops) serrulatus</i> (Fischer)	–	+	–
<i>E. (Macrurocylops) macrurus</i> (Sars)	–	+	+
<i>Cyclops scutifer</i> Sars, s. lat.	+	–	–
<i>Microcylops varicans</i> Sars	–	+	–
<i>Mesocylops leuckarti</i> (Claus)	+	+	–
Cladocera			
<i>Sida crystallina</i> O.F. Müller	+	+	+
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> s. str. (Liévin)	+	–	+
<i>Daphnia (Daphnia) longispina</i> (O.F. Müller)	+	–	–
<i>D. (D.) cristata</i> Sars	+	–	–
<i>Ceriodaphnia pulchella</i> s. lat. Sars	+	+	+
<i>Scapholeberis mucronata</i> s. lat. (O.F. Müller)	+	+	+
<i>Ophryoxus gracilis</i> Sars	+	+	–
<i>Eurycerus (Eurycerus) lamellatus</i> (O. F. Müller)	–	–	+
<i>Pleuroxus truncatus</i> (O. F. Müller)	+	–	+
<i>Chydorus sphaericus</i> (O. F. Müller)	+	+	+
<i>Pseudochydorus globosus</i> (Baird)	–	–	+
<i>Alonella excisa</i> (Fischer)	–	+	–
<i>Flavalona costata</i> (Sars)	+	–	–
<i>Coronatella (Coronatella) rectangula</i> Sars	–	+	+
<i>Biapertura affinis</i> (Leydig)	–	+	+
<i>Alona</i> sp.	–	–	+
<i>Alonopsis elongata</i> (Sars)	+	+	–
<i>Acroperus harpae</i> (Baird)	–	+	–
<i>Graptoleberis testudinaria</i> (Fischer)	–	+	–
<i>Bosmina (Bosmina) longirostris</i> (O.F. Müller)	–	–	+
<i>Bosmina (Eubosmina) cf. longispina</i> Leydig	+	+	+
<i>Polyphemus pediculus</i> (Linnaeus)	+	+	+
Rotifera			
<i>Notommata</i> sp.	–	+	–
<i>Cephalodella gibba</i> (Ehrenberg)	–	–	+
<i>Trichocerca (Diurella) musculus</i> (Hauer)	–	–	+
<i>T. (D.) porcellus</i> (Gosse)	–	–	+
<i>T. (s. str.) rattus</i> (Müller)	–	–	+
<i>Gastropus stylifer</i> Imhof	+	–	–
<i>Synchaeta tremula</i> (Müller)	–	–	+
<i>Polyarthra major</i> Burckhardt	+	–	–
<i>Ploesoma hudsoni</i> (Imhof)	–	+	–
<i>Dicranophorus forcipatus</i> (Müller)	–	–	+

Таксон Taxon	Плотвичное Plotvichnoye	Сиговое Sigovoye	Малое Окунёвое Maloye Okunevoye
<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse	+	+	–
<i>Lecane (Monostyla) lunaris</i> (Ehrenberg)	–	–	+
<i>L. (s. str.) luna</i> (Müller)	–	–	+
<i>Proales sigmoidea</i> (Skorikov)	–	–	+
<i>Euchlanis deflexa</i> Gosse	–	–	+
<i>E. dilatata</i> Ehrenberg	–	+	+
<i>Keratella cochlearis</i> (Gosse)	+	+	–
<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott)	+	+	–
<i>Notholca labis</i> Gosse	–	–	+
<i>Conochilus hippocrepis</i> (Schrank)	+	–	–
<i>C. unicornis</i> Rousselet	+	–	+
Bdelloida	+	–	+
Всего видов / Total species	27	26	32

Примечание: «+» – вид найден; «–» – вид не найден.
Note: “+” – species found; “–” – species not found.

При расчёте средних значений численности и биомассы зоопланктона и зообентоса для оценки вариабельности выборки определяли значения стандартной ошибки средней.

Результаты и обсуждение

Из исследованных озёр три являются сточными: два озера соединяются постоянными протоками напрямую с рекой Большой Паток, оз. Плотвичное – с р. Седью – правобережным притоком р. Большой Паток. Озеро Малое Окунёвое проточное. Характеристика озёр представлена в таблице 1.

Несмотря на небольшие площади, некоторые озёра отличались значительной глубиной. Температура воды в них даже в близкие сроки отбора проб, но в разные годы, существенно отличалась (табл. 1). Результаты химического исследования озера Малое Окунёвое показали, что для его воды характерны слабощелочная реакция (рН 7,3), невысокая цветность (28°), низкая удельная электропроводность (88 мкСм/см). Вода озера принадлежит к гидрокарбонатному классу, незначительная перманганатная окисляемость указывает на очень малое содержание органических веществ.

В зоопланктоне исследованных озёр обнаружено 55 видов и форм (табл. 2).

Все найденные таксоны являются обычными элементами планктонной фауны европейского северо-востока России [12]. Сходство планктонных фаун водоёмов было умеренным (I_s составлял 0,4–0,5).

Количественное развитие зоопланктона различалось значительно (табл. 3).

Относительно высокие показатели численности в озёрах Сиговое и Малое Окунёвое были обусловлены массовым развитием ветвистоусых раков, в первом – за счёт *P. pediculus* ($D_i = 78,5\%$), субдоминантами были: *K. longispina*, *B. (E.) cf. longispina longispina*, *A. priodonta*. Во втором – *B. longispina* ($D_i = 62,5\%$), субдоминанты: *E. dilatata*, *C. sphaericus*, *P. pediculus*, *S. mucronata* и *P. truncatus*. Оба доминирующих вида являются обычными обитателями разнотипных северных водоёмов, в том числе горных [13–15].

В озере, расположенном в бассейне р. Седью, многочисленными были веслоногие раки, представленные большей частью неполовозрелыми формами ($D_i = 64\%$), субдоминантами выступали *K. cochlearis*, *K. longispina*, *P. pediculus*, *D. (D.) cristata cristata*, *C. hippocrepis* и *C. unicornis*. Биомассу в планктонных сообществах озёр формировали низшие раки: в глубоководных озёрах Плотвичное и Сиговое – ювенильные формы веслоногих раков и *P. pediculus*; в мелководном проточном оз. Малое Окунёвое – *B. (E.) cf. longispina longispina*, *B. (B.) longirostris longirostris*, *P. pediculus*, *C. sphaericus* и *E. (E.) lamellatus lamellatus*. Преобладание в планктоне низших раков над коловратками является особенностью этих озёр. В большей части обследованных горных и предгорных водоёмов Полярного и Приполярного Урала, как западного, так и восточного макросклонов, в зоопланктоне преобладают коловратки [6, 16].

Таблица 3 / Table 3

Показатели количественного развития зоопланктона в исследованных озёрах
Indicators of quantitative development of zooplankton in the studied lakes

Таксон Taxon	Численность, тыс. экз./м ³ Abundance, thous. ind./m ³			Биомасса, г/м ³ Biomass, g/m ³		
	Плотвичное Plotvichnoe (n = 4)	Сиговое Sigovoye (n = 4)	Малое Окунёвое Maloye Okunevoye (n = 5)	Плотвичное Plotvichnoye (n = 4)	Сиговое Sigovoye (n = 4)	Малое Окунёвое Maloye Okunevoye (n = 5)
Rotifera	18,4±7,9	8,2±4,0	2,3±1,6	0,017±0,011	0,052±0,020	0,003±0,002
Cladocera	6,8±4,1	130,4±109,8	18,4±12,0	0,195±0,170	16,250±15,380	0,355±0,264
Sopropoda	45,4±15,9	5,3±2,1	3,0±2,2	0,245±0,125	0,049±0,016	0,031±0,023
Весь зоопланктон Total zooplankton	70,6±23,0	143,9±108,1	23,7±12,7	0,457±0,167	16,360±15,390	0,389±0,266

Таблица 4 / Table 4

Зообентос предгорных озёр бассейна р. Большой Паток
Zoobenthos of foothill lakes Bolshoy Patok River Basin

Таксон Taxon	Встречаемость, % Occurrence, %	Доля таксона в общей численности, % The share of the taxon in the total population, %				Доля таксона в общей биомассе, % Share of taxon in total biomass, %			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Hydrozoa	18,2	1,1	0,2	–	0,1	0,6	0,2	–	< 0,1
Nematoda	68,2	0,6	17,2	2,1	22,2	< 0,1	0,2	< 0,1	1,4
Oligochaeta	90,9	3,4	51,1	1,6	4,0	0,6	67,6	0,3	9,0
Hurudinea	45,5	0,6	0,1	17,9	0,3	19,5	0,1	20,4	14,6
Tardigrada	22,7	–	–	1,1	–	–	–	–	< 0,1
Mollusca	81,8	15,9	–	0,7	3,3	22,4	–	6,9	20,8
Cladocera	77,3	5,1	6,5	10,1	4,3	5,0	7,3	< 0,1	0,9
Harpacticoida	59,1	–	1,1	0,8	7,9	–	< 0,1	< 0,1	0,1
Cyclopoida	81,8	1,7	1,0	4,6	8,0	< 0,1	0,1	< 0,1	0,6
Ostracoda	40,9	0,6	–	–	9,4	< 0,1	–	–	0,1
Amphipoda	45,5	–	–	42,4	0,9	–	–	62,6	10,3
Araneina	4,6	–	–	–	< 0,1	–	–	–	< 0,1
Hydracarina	72,7	0,6	0,7	2,8	1,0	0,1	0,4	0,6	0,3
Collembola	4,6	–	–	–	< 0,1	–	–	–	0,1
Ephemeroptera, lv.	50,0	–	0,7	1,9	1,8	–	1,0	1,7	1,5
Plecoptera, lv.	9,1	–	–	0,8	–	–	–	0,4	–
Trichoptera, lv.	54,5	1,7	0,2	0,4	1,5	13,9	1,9	0,8	9,5
Trichoptera, pp.	4,6	–	–	0,1	–	–	–	0,2	–
Coleoptera, lv.	18,2	–	0,5	–	< 0,1	–	0,4	–	< 0,1
Coleoptera, im.	4,6	–	–	0,1	–	–	–	0,1	–
Megaloptera, lv.	4,6	–	–	–	< 0,1	–	–	–	0,3
Odonata, lv.	22,7	1,7	–	0,1	< 0,1	16,0	–	3,1	< 0,1
Chironomidae, lv.	95,7	64,2	17,0	12,9	32,7	20,6	16,0	1,6	28,8
Chironomidae, pp.	39,1	1,7	0,2	0,5	0,1	0,7	0,2	0,2	0,1
Ceratopogonidae, lv.	63,6	1,1	1,2	0,1	1,4	0,7	2,1	0,1	1,0
Diptera n/det., lv.	9,1	–	–	0,1	–	–	–	0,5	–

Примечание: «+» – вид найден; «–» – вид не найден; I – оз. Плотвичное; II – оз. в бассейне р. Потэмью; III – оз. Сиговое; IV – оз. Малое Окунёвое.

Note: “+” – species found; “–” – species not found; I – Lake Plotvichnoye; II – Lake in the Potem'yu River basin; III – Lake Sigovoye; IV – Lake Maloye Okunevoye.

Таблица 5 / Table 5

Средняя численность и средняя биомасса зообентоса предгорных озёр
Average abundance and average biomass of zoobenthos in foothill lakes

Средняя численность, тыс. экз./м ² Average abundance, thous. ind./m ²				Средняя биомасса, г/м ² Average biomass, g/m ²			
I	II	III	IV	I	II	III	IV
1,4±0,6	5,2±2,4	3,0±1,4	43,6±9,5	2,2±1,2	3,8±1,6	4,6±3,3	5,5±2,1

Примечание: I – оз. Плотвичное; II – оз. в бассейне р. Потэмью; III – оз. Сиговое; IV – оз. Малое Окунёвое.

Note: “+” – species found; “-” – species not found; I – Lake Plotvichnoye; II – Lake in the Potem’yu River basin; III – Lake Sigovoye; IV – Lake Maloye Okunevoye.

Таблица 6 / Table 6

Зообентос на разных грунтах предгорных озёр
Zoobenthos on different bottom of foothill lakes

Показатели Indicators	Грунты / Bottom		
	ил silt	твёрдые грунты hard bottom	заросли водных растений thickets of aquatic plants
Средняя численность, тыс. экз./м ² Average abundance, thous. ind./m ²	25,9±8,8	7,5±5,4	14,4±7,6
Доминирующие группы по численности, % Dominant groups by number, %	Chironomidae – 36,6 Nematoda – 22,7	Amphipoda – 43,2 Hirudinea – 18,3 Cladocera – 13,3	Harpacticoida – 28,7 Nematoda – 16,0 Chironomidae – 15,9 Copepoda – 11,3
Средняя биомасса, г/м ² Average biomass, %	5,5±1,5	25,9±20,4	1,6±0,3
Доминирующие группы по биомассе, % Dominant groups by biomass, %	Chironomidae – 25,6 Oligochaeta – 24,2 Mollusca – 14,8	Amphipoda – 63,4 Hirudinea – 20,5	Chironomidae – 34,3 Mollusca – 29,7 Amphipoda – 12,4 Oligochaeta – 10,5

В составе зообентоса зарегистрировано 23 таксономических группы гидробионтов (табл. 4).

В каждом из обследованных озёр присутствовало от 13 до 21 группы бентоса. Наибольшей частотой встречаемости отличались личинки хирономид (95,7%), олигохеты (78,3%), моллюски и веслоногие раки (по 82,6%). С частотой более 60% встречены нематоды, ветвистоусые раки, гарпактикоиды, клещи и мокрецы. Довольно часто встречались пиявки (43,5%), остракоды (39,1%), амфиподы (43,5%), подёнки (47,8%), ручейники (52,2%), стрекозы (21,7%). Среди редких групп можно отметить пауков, коллембол, веснянок, имаго жуков и вислоккрылок.

Численность зообентоса в большинстве озёр не превышала 5,2 тыс. экз./м², лишь в оз. Малое Окунёвое она была более чем в 8 раз выше из-за отбора проб в августе, в период массового развития личинок хирономид нового поколения (табл. 5). Доминировали по числу особей преимущественно личинки хирономид и нематоды. Биомасса зообентоса во всех озёрах была невысокой (2,2–5,5 г/м²). Доминантами по биомассе являлись хироно-

миды, пиявки, реже амфиподы, моллюски или олигохеты (табл. 4).

Максимальной численностью характеризовались илистые грунты, наименьшей – мелкие заиленные валуны, однако на них отмечена наибольшая биомасса бентоса (табл. 6).

Круглые черви (Annelidae) представлены малоцетинковыми червями и пиявками. Среди олигохет преобладали виды из сем. Naididae и Tubificidae. Моллюски представлены мелкими двустворчатыми сем. Sphaeriidae и катушками сем. Planorbidae. Из ветвистоусых ракообразных обычны *E. (E.) lamellatus lamellatus*, *C. sphaericus*, *B. affinis* и др., из веслоногих – *Megacyclops viridis* (Jurine) и *E. (E.) serrulatus serrulatus*. Многочисленные в некоторых озёрах амфиподы относились к одному виду – *Gammarus lacustris* (Sars). Фауна подёнок и веснянок довольно бедная: из подёнок встречены *Caenis horaria* (Linnaeus), *Ameletus inopinatus* (Eaton) и *Leptophlebia sp.*, из веснянок – личинки *Nemoura sp.* Более разнообразны в озёрах ручейники – *Cyrnus flavidus* McLachlan и *Oxyethira sp.*; менее обильны *Molanna angustata* Curtis, *Limnephilus decipiens* (Kolenati), молодые личинки из сем.

Leptoceridae, Polycentropodidae, Phryganeidae (р. *Agrypnia*). Особенностью исследованных предгорных водоёмов является обитание в них личинок стрекоз, которые редко встречаются в горных озёрах Урала [5]. Обнаружены личинки *Sympetrum flaveolum* (Linnaeus), *Somatochlora* sp. По имаго в оз. Сиговое определены стрекозы – *Cordulia aenea* (Linnaeus) и *Coenagrion hastulatum* (Charpentier). Немногочисленны личинки жуков сем. Dytiscidae из родов *Hygrotus* и *Hydroporus* juv.

Зоопланктон и зообентос исследованных нами озёр отличался большим видовым богатством и количественным развитием по сравнению с предгорными озёрами другого притока р. Щугор – р. Малый Паток [17].

Заключение

Таким образом, в исследованных предгорных озёрах выявлено 55 видов и форм зоопланктона и 24 таксономические группы зообентоса. Относительно высокие показатели численности и биомассы зоопланктона обусловлены доминированием в планктонных сообществах низших раков. В составе зообентоса преобладали хирономиды, олигохеты, амфиподы и пиявки. Количественное развитие зообентоса невысокое и широко варьирует в зависимости от сезона и типа озера и соответствует географическому положению водоёмов.

Работа выполнена в рамках государственного задания рег. № 122040600025-2.

References

1. Yakovlev V.A. Freshwater zoobenthos of Northern Fennoscandia. (Diversity, structure and anthropogenic dynamics). Part 2. Apatity: KNTs RAN, 2005. 145 p. (in Russian).
2. Bruce S., Poikane S., Lyche Solheim A., Birk S. Biological assessment of European lakes: ecological rationale and human impacts // *Freshw. Biol.* 2013. V. 58. P. 1106–1115.
3. Osenberg C.W., Schmitt R.J., Holbrook S.J., Abu-Saba K.E., Flegal A.R. Detection of environmental impacts: natural variability, effect size and power analysis // *Ecol. Appl.* 1994. V. 4. P. 16–30.
4. Shubina V.N. Hydrobiology of the salmon river in the Northern Urals. Leningrad: Nauka, 1986. 157 p. (in Russian).
5. Loskutova O.A., Zelentsov N.I., Scherbina G.Kh. Amphibiotic insects of mountain lakes and small water-courses in the Urals // *Inland Water Biology.* 2010. V. 3. No. 1. P. 11–20. doi: 10.1134/S1995082910010025
6. Loskutova O.A., Ponomarev V.I. Aquatic fauna in Maly Patok River basin (Subpolar Urals). 2. Invertebrates // *Inland Water Biology.* 2019. V. 12. No. 2. P. 6–14. doi: 10.1134/S1995082919040084
7. Resources of surface waters of the USSR. Hydrological knowledge / Eds. I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. V. 3. 664 p. (in Russian).
8. Kononova O.N., Fefilova E.B. Methodological guidelines for determining the size-weight characteristics of zooplankton organisms in the European North of Russia. Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2018. 152 p. (in Russian).
9. Protasov A.A. Life in the hydrosphere. Essays on general hydrobiology. Kiev: Akadempriodika, 2011. 704 p. (in Russian).
10. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: methods, criteria, solutions. V. 1. Moskva: Nauka, 2005. 281 p. (in Russian).
11. Ponomarev V.I. Ichthyofauna of the Bolshoy Patok River basin (Subpolar Urals) // *Fauna Uralsi Sibiri.* 2018. No. 1. P. 144–151 (in Russian). doi: 10.24411/2411-0051-2018-10112
12. Flora and fauna of water bodies of the European North (on the example of the lakes of the Bolshezemelskaya tundra). Leningrad: Nauka, 1978. 192 p. (in Russian).
13. Butorina L.G. Biology and life cycle of *P. pediculus* // *Tr. IBVV.* Leningrad, 1971. P. 155–179 (in Russian).
14. Vekhov N.V. Distribution and ecological features of some Cladocera in subarctic water bodies of the European part of the USSR // *Vestnik zoologii.* 1982. No. 4. P. 43–48 (in Russian).
15. Dubovskaya O.P., Kotov A.A., Korovchinsky N.M., Smirnov N.N., Sinev A.Y. Zooplankton of lakes in the spurs of the Putorana Plateau and adjacent territories (north of Krasnoyarsk Krai) // *Contemporary Problems of Ecology.* 2010. V. 3 (4). P. 401–434. doi: 10.1134/S1995425510040065
16. Bogdanov V.D., Bogdanova E.N., Gavrilov A.L., Melnichenko I.P., Stepanov L.N., Yarushina M.I. Biore-sources of aquatic ecosystems of the Polar Urals. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. 167 p. (in Russian).
17. Loskutova O.A. Zoobenthos of different types lakes on the western slope of the Subpolar Urals (the Maly Patok River basin) // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk.* 2011. V. 13. No. 1 (5). P. 1124–1126 (in Russian).

Химический состав атмосферных осадков, подкроновых и поверхностных вод в среднетаёжных лиственных насаждениях послерубочного происхождения

© 2022. Т. А. Пристова, к. б. н., н. с.,

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: pristova@ib.komisc.ru

Проведены исследования природных вод в разновозрастных лиственных насаждениях послерубочного происхождения в Княжпогостском районе Республики Коми. Показана трансформация химического состава в ряду: атмосферные (дождевые) осадки – подкроновые воды – ручей. Показано, что при прохождении через кроны деревьев, содержание большинства ионов в осадках увеличивается. Выявлено влияние возраста и состава древостоя на химический состав подкроновых вод. Установлено, что исследуемые природные воды слабокислые, маломинерализованные, гидрокарбонатные и различаются по гидрохимическому типу: атмосферные осадки – гидрокарбонатно-сульфатно-калиевые, подкроновые воды в берёзово-еловом молодняке – гидрокарбонатно-калиево-сульфатные, в осиново-берёзовом насаждении – гидрокарбонатно-калиево-кальциевые, воды ручья – гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. Изменение гидрохимического типа исследуемых вод свидетельствует о существенной трансформации древостоем атмосферных осадков при прохождении их сквозь кроны деревьев. Среднегодовое содержание компонентов химического состава в исследуемых водах практически не превышает ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения. Полученные результаты могут быть использованы в качестве фоновых при мониторинге качества природных вод на территориях, представленных среднетаёжными лиственными лесами послерубочного происхождения.

Ключевые слова: средняя тайга, лиственные леса, химический состав осадков и поверхностных вод.

The chemical composition of atmospheric precipitation, throughfall and surface waters in the middle taiga deciduous stands of post-cutting origin

© 2022. Т. А. Pristova ORCID: 0000-0002-8266-8113

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

The chemical composition of atmospheric precipitation (rainfall), undercrown throughfall and surface (stream) waters in the Komi Republic (62°18'N 50°55'E) are studied. The objects of the study were deciduous and deciduous-coniferous forest of post-harvest origin of different ages, which are formed after spruce forests by natural reforestation. Water samples were taken monthly at constant points for 2 years: in a stream, rainfall, throughfall of birch, aspen, spruce and between crowns. The chemical composition of the throughfall is affected by the age and tree composition of the stand. The studied natural waters are slightly acidic, low salinity, hydrocarbonate class and differ in hydrochemical type. A series of decreasing ion concentrations in atmospheric precipitation: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^-$, throughfall of birch-spruce young forest: $\text{HCO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, throughfall aspen-birch stand: $\text{HCO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^-$, in the stream waters: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cl}^-$. The mineralization increases in a row: atmospheric precipitation < throughfall of birch-spruce young forest < throughfall of aspen-birch stand < stream water. The range of average annual contents of N, S, P, K, Zn, Al, Cu, Cd in brook waters is comparable or lower than in atmospheric precipitation; therefore, their removal beyond the root layer in the studied forest ecosystem can be compensated by atmospheric precipitation. The average annual content of the components of the chemical composition in the studied waters practically does not exceed the maximum permissible concentrations, with the exception of Fe in the waters of the stream, due to the influence of soils and not associated with pollution. The obtained results can be used as background ones when monitoring the quality of natural waters in the terrain represented by middle-taiga zone deciduous forests.

Keywords: middle taiga, deciduous forests, chemical composition of precipitation, stream.

Лесные экосистемы оказывают существенное влияние на изменение химического состава и количество атмосферных осадков. Дождевые воды, проникая сквозь кроны, трансформируются за счёт растворения веществ, выделяемых и накапливаемых на поверхности листьев, хвои, сучьев, стволов, в процессе жизнедеятельности растений, микроорганизмов и насекомых, населяющих древесный полог [1–4]. Это приводит к увеличению минерализации подкроновых вод, по сравнению с атмосферными осадками [1, 5–7]. В частности, непосредственно из листьев и тканей растений вымываются натрий и калий [6]. В целом же только часть элементов вымывается из крон деревьев, остальные поступают из атмосферы [6, 8]. Дождевые осадки осуществляют перенос элементов из атмосферы в экосистемы и обеспечивают биогенные циклы в системе растение–почва. Рубка лесов оказывает двойное влияние на водную миграцию элементов и химический состав природных вод. С одной стороны, за счёт естественного лесовосстановления и последующего возобновления лиственных насаждений состав и основные характеристики древостоя существенно меняются, что приводит к изменению характера задержания атмосферных осадков кронами деревьев и их химического состава. С другой стороны, рубка леса, воздействуя на почву и нарушая её верхний слой, влияет на состав жидкой фазы почвы, что в конечном итоге приводит к изменению характера почвенных и поверхностных вод [1, 2, 9, 10]. Влияние древостоя лиственных лесов таёжной зоны на химический состав дождевых осадков и поверхностных вод, особенно микроэлементный состав, слабо изучен [1, 3, 8]. В подзоне средней тайги Республики Коми подобные исследования немногочисленны [10, 11].

Цель исследования – дать характеристику химическому составу атмосферных (дождевых) осадков, подкроновых и поверхностных вод в среднетаёжных лиственных биогеоценозах послерубочного происхождения для использования как регионального фона при оценке качества природных вод.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в окрестностях д. Кылтово Княжпогостского района Республики Коми на базе Ляльского лесозащитного стационара ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (62°18' с. ш. 50°55' в. д.). Осадкоприёмники устанавливали на открытом месте (поляне)

(участок № 1), в 12-летнем берёзово-еловом молодняке разнотравного типа (состав древостоя 8Б2Е ед. С) (участок № 2) и 38-летнем осиново-берёзовом насаждении разнотравного типа (5Ос4Б1Е ед. Пх) (участок № 3), сформировавшихся на вырубке ельников черничных. Почва – торфянисто-подзолисто-глееватая. Пробы поверхностных вод отбирали в ручье, впадающем в р. Кылтовка (бассейн р. Вымь) (участок № 4). Осадки в лесу (подкроновые воды) собирали под кронами берёзы, ели, осины, в межкроновых пространствах («окнах»), затем после проведения химического анализа данные усредняли. Отбор проб проводили с периодичностью 1 раз в месяц или по мере поступления осадков в 15–20-кратных повторностях с мая по октябрь [12]. В экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в пробах воды рН и содержание гидрокарбонатов (HCO_3^-) определены потенциометрически, содержание Cl , $\text{P}_{\text{общ.}}$, $\text{S}_{\text{общ.}}$, Ca , Mg , K , Na , Mn , Zn , $\text{Fe}_{\text{общ.}}$, Al , Cd , Ni , Cu , Pb , Co , $\text{Cr}_{\text{общ.}}$ – с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП), SO_4^{2-} – турбидиметрическим, PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- – фотометрическим методом. Концентрацию органического углерода ($\text{C}_{\text{орг.}}$) определяли на анализаторе общего органического углерода TOC-V («Shimadzu», Япония).

Результаты и обсуждение

Важным информативным показателем химического состава природных вод является их кислотность (рН). Согласно среднегодовым значениям рН, атмосферные осадки, подкроновые и поверхностные воды слабокислые (табл. 1), что согласуется с исследованиями других авторов [1–3, 10, 11, 13]. За исследуемый период рН вод в отобранных пробах варьировал от 5,1 до 7,2. Значения кислотности вод ручья относительно постоянны, кроме увеличения в июле – августе [14]. Это связано с динамикой растворимого $\text{C}_{\text{орг.}}$ в почвенных растворах и его последующей водной миграцией [2, 13].

Органический углерод – доминирующий компонент в химическом составе исследуемых вод. Вымывание органического вещества осадками из древесной растительности увеличивает его концентрацию в подкроновых водах в 2–4 раза (табл. 1). Наиболее высоким содержанием $\text{C}_{\text{орг.}}$ отличаются воды ручья. Его основным источником являются почва и подстилка, что связано с содержанием в них водорастворимого органического вещества – компонента, активно вовлекаемого в мигра-

Таблица 1 / Table 1

Кислотность и химический состав атмосферных осадков, подкроновых и поверхностных вод (средние данные за май–октябрь), мг/дм³ / Acidity and chemical composition of precipitation, undercrown and surface waters (average data for May–October), mg/dm³

№ участка Plot number	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	P _{общ.} P _{tot.}	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Fe _{общ.} Fe _{tot.}	C _{орг.} DOC
2006 г. / 2006												
1	5,6	1,33	0,17	0,82	0,04	*	0,29	0,07	0,53	0,18	0,01	3,18
2	6,2	9,43	0,42	0,34	0,61	0,01	0,82	0,36	3,32	0,24	0,01	12,00
3	6,3	22,13	1,66	1,34	2,47	0,01	2,76	0,86	9,84	0,26	0,03	13,60
4	5,6	15,38	1,07	0,97	0,03	*	4,06	1,13	1,83	0,85	0,66	37,60
2007 г. / 2007												
1	6,1	5,48	0,30	1,29	0,09	*	0,33	0,06	0,54	0,22	0,02	2,37
2	6,7	6,71	0,67	1,12	0,70	0,01	0,70	0,24	2,45	0,16	0,01	4,75
3	6,8	11,13	1,49	0,77	1,56	0,01	1,54	0,54	4,91	0,32	0,02	6,19
4	6,1	10,24	0,79	0,10	0,02	*	4,75	1,35	0,10	0,80	0,54	24,98
Средняя концентрация за 2006–2007 гг. / Average concentration for 2006–2007												
1	5,9	3,41	0,24	1,06	0,07	*	0,31	0,07	0,54	0,20	0,02	2,78
2	6,4	8,07	0,55	0,73	0,67	0,01	0,76	0,30	2,89	0,20	0,01	8,38
3	6,6	16,63	1,58	1,06	2,02	0,01	2,46	0,70	7,38	0,29	0,03	9,90
4	5,9	12,81	0,93	0,54	0,03	*	4,41	1,24	0,97	0,83	0,60	31,29
ПДК _{р.х.} MPC _г	6,5–8,5	–	300	100	–	0,5	180	40	50	120	–	–

Примечание: * – ниже пределов обнаружения; прочерк означает, что норматив не установлен; ПДК_{р.х.} – предельно допустимые концентрации для водных объектов рыбохозяйственного значения [16].

Note: * – below the detection limit of the method; a dash indicates that the standard is not set; MPC_г – maximum permissible concentration for water bodies of fishery [16].

ционные потоки и являющегося результатом биологического круговорота [15].

Древесная растительность существенно влияет на концентрацию гидрокарбонат-ионов в осадках. Например, в 2006 г. концентрация HCO₃⁻ в подкроновых водах осиново-берёзового насаждения была почти в 17 раз выше, чем в атмосферных осадках (табл. 1). Уровень содержания HCO₃⁻ в подкроновых и поверхностных водах связан с интенсивным разложением органического вещества подстилки и растительного опада, так как CO₂ является конечным продуктом распада любого органического материала [17]. Максимальное содержание HCO₃⁻ наблюдается в водах ручья, достигая 15,4 мг/дм³. Высокое содержание HCO₃⁻ в поверхностных водах отмечается и другими исследователями [18, 19].

Содержание хлорид-ионов в подкроновых и поверхностных водах в 2–10 раз выше, чем в атмосферных осадках (табл. 1). Увеличение концентрации Cl⁻ в осадках, прошедших через полог древостоя, для таёжных лесов отмечается и другими исследователями [3, 10]. Вынос Cl⁻ за пределы исследуемых биогеоценозов в поверхностные воды частично компенсируется поступлением с атмосферными осадками.

Концентрация сульфат-ионов в атмосферных осадках выше, чем в подкроновых и поверхностных водах (табл. 1). Сера практически не выщелачивается из крон деревьев и почвы, что связано с поглощением растительностью соединений серы из осадков [2].

Содержание общего фосфора в атмосферных осадках не превышает 0,09 мг/дм³, в подкроновых водах его концентрация увеличивается до 2,47 мг/дм³ (табл. 1). За пределы корнеобитаемого слоя в поверхностные воды P_{общ.} выносятся немного меньше, чем поступает с атмосферными осадками. Эта особенность водной миграции фосфора в лесных экосистемах, связанная с его биогенностью и активным поглощением растительностью, отмечается и другими исследователями [5, 18].

В водах под кронами деревьев кальция в 2–7 раз больше, чем в осадках, а в ручье в 2–6 раз выше, чем в подкроновых водах (табл. 1). Это связано с вымыванием кальция из крон деревьев и почвы, которая отличается высоким природным содержанием в материнской породе. Катионы кальция относятся к типоморфным (основным) соединениям поверхностных вод [17].

Таблица 2 / Table 2

Химический состав атмосферных осадков, подкроновых и поверхностных вод (средние данные за май – октябрь), мкг/дм³ / The chemical composition of precipitation, undercrown water and surface water (average data for May – October), μg/dm³

№ участка Number of plot	Mn	Zn	Al	Cu	Cd	Cr	Co	Pb	Ni	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
2006 г. / 2006											
1	1,61	23,33	7,05	0,65	0,10	0,01	0,01	0,01	0,70	10,00	20,24
2	6,00	34,51	9,06	1,47	0,01	0,01	*	0,07	1,13	98,01	96,02
3	9,50	27,09	10,50	2,13	0,16	0,01	*	0,10	1,63	96,12	137,1
4	10,07	14,43	13,43	1,20	0,13	*	*	4,40	2,57	9,70	9,89
2007 г. / 2007											
1	3,70	20,71	7,90	2,27	0,26	*	*	*	0,01	9,23	57,34
2	10,80	30,43	5,90	1,87	0,01	*	0,01	0,01	0,10	117,01	98,74
3	9,80	24,76	6,80	2,95	0,10	*	*	0,01	0,93	157,10	118,1
4	22,48	17,19	21,69	0,98	0,10	*	*	0,10	3,65	7,05	8,17
Средняя концентрация за 2006–2007 гг. / Average concentration for 2006–2007											
1	2,66	22,02	7,48	1,46	0,18	0,01	0,01	п/о	0,36	9,62	38,79
2	8,40	32,47	7,48	1,67	0,01	0,01	0,01	0,04	0,62	107,51	97,38
3	9,65	25,93	8,65	2,54	0,13	*	*	0,05	1,28	126,61	127,6
4	13,17	15,81	17,56	1,09	0,12	*	*	2,25	3,11	8,38	9,03
ПДК _{в.к.} , мкг/дм ³ MPC _v , μg/dm ³	10	10	40	1	5	70	10	6	10	80	400

Примечание: см. обозначения к таблице 1.
Note: see designations in Table 1.

Содержание магния в подкроновых водах, прошедших через полог древостоя, в 4–10 раз выше, чем в атмосферных осадках в связи с высоким уровнем выщелачивания из древесной растительности (табл. 1). Высокое содержание Mg в ручье обусловлено его типоморфностью в отношении поверхностных вод [17].

Калий довольно активно выщелачивается из крон деревьев и при этом практически не выносится в поверхностные воды (табл. 1). Невысокая концентрация калия в поверхностных водах отмечается и другими исследователями [18, 19]. Это связано с его активным поглощением растениями напочвенного покрова, корнями деревьев в почвенном профиле и включением в биогеохимический круговорот [6–8].

Среднегодовая концентрация натрия в атмосферных осадках и подкроновых водах приблизительно одинакова, что свидетельствует о низкой степени выщелачивания натрия из крон деревьев (табл. 1). В ручье концентрация натрия в 3–4 раза выше, чем в осадках, что указывает на его активный вынос за пределы корнеобитаемого слоя. Похожая тенденция отмечается и другими исследователями [2, 18]. Миграция натрия из почвы компенсируется привносом из атмосферы с осадками [8].

В атмосферных осадках и подкроновых водах содержание железа на порядок ниже, чем в ручье (табл. 1). Ионы железа практически не выщелачиваются из крон деревьев, поступая в поверхностные воды из почвы. Для среднетаёжных березняков Карелии, наоборот, наблюдается увеличение железа в подкроновых водах, которое исследователи объясняют поступлением из пыли атмосферы и её смывом с осадками с поверхности листьев [3].

Содержание общего азота (N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, N-NH₄⁺) в атмосферных осадках за исследуемый период варьирует от 0,001 до 4,9 мг/дм³. Для NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ характерно увеличение концентрации при прохождении осадков сквозь полог древостоя и снижение в водах ручья (табл. 2). С подкроновыми водами на поверхность почвы поступает больше азота, чем выносится за её пределы в поверхностные воды. Низкое содержание ионов аммония и нитратов в поверхностных водах отмечается и другими исследователями [18, 19]. Это связано с тем, что азот является основным лимитирующим питательным элементом в процессах продукции и деструкции растительности бореальных лесов, поэтому в лесных экосистемах существуют механизмы его удержания [17].

Концентрация марганца в подкроновых водах выше, чем в атмосферных осадках (табл. 2). Это результат выщелачивания из кроны, особенно из листьев деревьев [5]. Обогащение вод ручья Mn происходит за счёт его выноса из органогенных и минеральных горизонтов почвы [19, 20].

Концентрация Zn, Al, Cu, Cd, Ni, Pb, Cr, Co довольно низкая – менее 0,001 мг/дм³ или ниже пределов обнаружения (табл. 2). Как правило, в подкроновых и поверхностных водах этих элементов, за исключением Cd и Pb, содержится больше, чем в атмосферных осадках. В условиях Карелии для Cd и Pb наблюдается похожая картина, а для Zn, Al, Cu, наоборот – вынос в поверхностные воды ограничен удерживающей способностью почвы [3, 18]. Такие элементы, как Co, Pb, Cd, Cr, Ni в некоторых пробах имеют концентрации ниже пределов обнаружения, что связано с отсутствием атмосферного загрязнения на исследуемой территории.

В исследуемых водах наблюдается различие в концентрации ионов в зависимости от года проведения исследований (табл. 1, 2). Например, содержание HCO_3^- в атмосферных осадках в 2007 г. в 4 раза выше, чем в 2006 г., а в поверхностных и подкроновых водах, наоборот, в 2006 г. в 1,5–2 раза выше, чем в 2007 г. (табл. 1). Эти различия обусловлены погодными условиями: июль 2006 г. был прохладным и дождливым, а в августе количество осадков было ниже нормы.

Для большинства определяемых ионов их среднегодовая концентрация в осиново-берёзовом насаждении выше, чем в берёзово-еловом молодняке (табл. 1, 2). Возможно, это различие связано с тем, что в более молодых фитоценозах, которые расходуют существенную часть элементов на формирование органической массы древостоя, из ассимилирующих органов их выщелачивается меньше, чем в средневозрастных и приспевающих насаждениях [20]. Разница в содержании компонентов также может быть обусловлена составом древостоя исследуемых насаждений. В осиново-берёзовом насаждении, в отличие от молодняка, осина является доминирующей древесной породой. Согласно проведённым исследованиям, в осадках, прошедших сквозь кроны осины, концентрация большинства определяемых ионов, как правило, выше, чем под кронами берёзы. Например, в осадках, собранных в июне 2006 г. в осиново-берёзовом насаждении под кронами берёзы содержание кальция состав-

ляло 0,9, под кронами осины – 1,2 мг/дм³, в июне 2007 г. содержание калия составило 4,1 и 7,8 мг/дм³ соответственно.

Исследуемые природные воды мало-минерализованы (≤ 45 мг/дм³). Согласно среднегодовым показателям концентрации в атмосферных осадках, доминирующие ионы в порядке убывания можно расположить в ряд: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^-$, в подкроновых водах берёзово-елового молодняка: $\text{HCO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, осиново-берёзового насаждения: $\text{HCO}_3^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^-$, ручья: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cl}^-$ (табл. 1). По гидрохимическому типу атмосферные осадки – гидрокарбонатно-сульфатно-калиевые, подкроновые воды – гидрокарбонатно-калиево-кальциевые, поверхностные воды – гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. Исследуемые листовые древостои значительно трансформируют химический состав атмосферных осадков, увеличивая их минерализацию и изменяя гидрохимический тип. В ельниках черничных, расположенных в 12 км от исследуемых объектов, воды также мало-минерализованы, подкроновые – гидрокарбонатно-калиево-кальциевые, поверхностные воды – гидрокарбонатно-кальциево-магниевые по гидрохимическому типу [11]. По сравнению с ельниками черничными [11], уровень концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$, Ca, Na, Mg, Fe, HCO_3^- , NO_3^- , P, Mn, Zn, Al в подкроновых водах исследуемых насаждений ниже (табл. 1, 2). Исследуемые подкроновые и поверхностные воды схожи с ельниками – они также мало-минерализованы и относятся к гидрокарбонатному классу, но отличаются более низким уровнем минерализации и концентрации элементов. По-видимому, ельник черничный воздействует на химический состав подкроновых вод значительно существеннее, чем исследуемые листовые насаждения. Следует выделить особенность подкроновых вод в берёзово-еловом молодняке в исследуемые годы, которые по гидрохимическому типу и степени минерализации отличаются от вод осиново-берёзового насаждения. Это позволяет судить о меньшем влиянии молодняка на трансформацию химического состава дождевых осадков по сравнению с осиново-берёзовым насаждением и ельником черничным [11]. Среднее содержание элементов в исследуемых водах практически не превышает ПДК_{р.х.}, поэтому полученные результаты могут использоваться в качестве регионального фона при оценке атмосферных загрязнений.

Заключение

Проведены исследования химического состава атмосферных осадков, подкроновых и поверхностных вод на территории Княжпогостского района Республики Коми, где с конца 70-х по 90-е гг. XX века проводили рубки, а в настоящее время произрастают разновозрастные лиственные и лиственно-хвойные насаждения, формирующиеся в процессе естественного лесовосстановления. Установлено, что трансформация природных вод в ряду атмосферные осадки – подкроновые воды – ручей для большинства определяемых компонентов химического состава проявляется в увеличении концентрации. Диапазон среднегодового содержания N, S, P, K, Zn, Al, Cu, Cd в водах ручья сопоставим или ниже, чем в атмосферных осадках, поэтому их вынос за пределы корнеобитаемого слоя в исследуемых лесных биогеоценозах может компенсироваться атмосферными осадками. Установлено, что изучаемые природные воды маломинерализованы, по гидрохимическому типу атмосферные осадки – гидрокарбонатно-сульфатно-калиевые, подкроновые воды в берёзово-еловом молодняке – гидрокарбонатно-калиево-сульфатные, в осиново-берёзовом насаждении – гидрокарбонатно-калиево-кальциевые, воды ручья – гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. Данные, полученные по химическому составу природных вод, практически не превышают значений ПДК, поэтому их можно применять в качестве фоновых для подзоны средней тайги, при мониторинге атмосферных загрязнений на территориях, представленных производными насаждениями послерубочного происхождения.

Работа выполнена в рамках темы госзадания Института биологии Коми научного центра УрО РАН № 122040100031-8 «Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России».

Выражаю благодарность сотрудникам отдела лесобиологических проблем Севера и лично профессору, д. б. н. К. С. Бобковой, а также сотрудникам экоаналитической лаборатории ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

References

1. Kulikova V.K. Leaching of nutrients from tree crowns in spruce and birch-spruce stand of Karelia // Les i pochva. Krasnoyarsk: Krasnyarskoye knizhn. izd-vo, 1968. P. 288–295 (in Russian).

2. Snakin V.V., Prisyazhnaya A.A., Rukhovich O.V. Composition of the liquid phase of soils. Moskva: Izd-vo REFIA, 1997. 325 p. (in Russian).

3. Shiltsova G.V., Lastochkina V.G. Influence of the canopy of pine and birch forests on the chemical composition of precipitation in the Kivach reserve // Proceeding of Karelian Research Centre of RAS. 2006. V. 10. P. 180–184 (in Russian).

4. Päivänen J. Distribution of precipitation in different stands // Silva Fennica. 1966. V. 119. Article No. 4732 (in Finnish). doi: 10.14214/sf.a14290

5. Gubareva V.A. The role of atmospheric precipitation in the cycle of mineral elements in oak forests of forest-steppe // Cycle of chemicals in the forest. Moskva: Nauka, 1982. 112 p. (in Russian).

6. Arianoutsou M. Atmospheric deposition of nutrients in a coastal magus ecosystem of northeastern Greece // International Journal of Biometeorology. 1989. No. 33. P. 124–130. doi: 10.1007/BF01686289

7. Derom J. Atmospheric deposition and the mobility of cations in forest soil // Geological Survey of Finland. 1991. No. 9. P. 29–39.

8. Ponomareva V.V., Rozhnova T.A., Sotnikova N.S. Features of the biological cycle in coniferous forests of the humid climate based on the results of lysimetric studies // Biological productivity and circulation of chemical elements in plant communities. Leningrad: Nauka, 1971. P. 220–226 (in Russian).

9. Kralovec V., Kliment Z., Vlcek L. Evaluation of soil water retention in forest and non-forest environment // Zpravy Lesnickeho Vyzkumu. 2016. V. 61. No. 3. P. 181–189 (in Czech).

10. Arhegova I.B., Kuznetsova E.G. Influence of woody plants on the chemical composition of atmospheric precipitation in the process of restoring middle taiga forests // Lesovedeniye. 2011. No. 3. P. 34–43 (in Russian).

11. Robakidze E.A., Torlopova N.V., Bobkova K.S. Chemical composition of wet precipitation in old-growth middle-taiga spruce stands // Geochemistry International. 2013. V. 51. No. 1. P. 65–75. doi: 10.1134/S0016702912110092

12. Manual control of atmospheric pollution / Ed. A.D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 540 p. (in Russian).

13. Rasilo T., Ojala A., Huotari J., Starr M., Pumpanen J. Concentrations and quality of DOC along the terrestrial-aquatic continuum in a boreal forested catchment // Freshwater Science. 2015. V. 34. No. 2. P. 440–455.

14. Pristova T.A. Chemical composition of surface waters in the derivative deciduous forests (basin of the river Vym') // Voda: Khimiya i Ekologiya. 2019. No. 10–12. P. 74–79 (in Russian). doi: 10.18334/watchemec.12.121.74-79

15. Kaurichev I.S., Yashin I.M. Formation of water-soluble organic substances as a stage of transformation of plant residues // Izvestiya TSKhA. 1989. V. 1. P. 47–57 (in Russian).

16. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated December 13, 2016 "On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance" (Reg. in the Ministry of Justice of Russia on 13.01.2017 No. 45203) [Internet resource] http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155 (Accessed: 05.03.2022) (in Russian).

17. Bashkin V.N. Biogeochemistry. Moskva: Novyy mir, 2004. 584 p. (in Russian).

18. Potapova I.Yu. The role of atmospheric precipitation in the formation of chemical composition of surface

waters // Proceeding of Karelian Research Centre of RAS. 2011. No. 4. P. 134–137 (in Russian).

19. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096

20. Kozhevnikova N.K., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Lupakov S.Yu., Shamov V.V. Water migration of macroelements in coniferous broad-leaved forests of Sikhotealin // Sibirskiy Lesnoy Zhurnal. 2017. No. 3. P. 60–73 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20170306

Влияние высушенных ягод голубики и обогащённых ими продуктов питания на показатели метаболизма при интоксикации тетрахлорметаном

© 2022. А. В. Еликов¹, к. м. н., доцент, П. И. Цапок¹, д. м. н., зав. кафедрой,
Е. М. Карпова², к. б. н., руководитель научных исследований и разработок,
Д. Б. Локтев², к. т. н., директор, В. А. Козвонин^{1,3}, к. м. н., доцент, с. н. с.,
Л. Н. Шмакова¹, к. т. н., зав. кафедрой,

¹Кировский государственный медицинский университет,
610998, Россия, г. Киров, ул. Карла Маркса, д. 112,

²ООО «Событие»,
195084, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Детский переулок, д. 5,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: anton_yelikov@mail.ru

В работе представлена оценка эффективности использования функциональных продуктов питания, обогащённых порошком ягод голубики (*Vaccinium uliginosum* L.) для снижения проявлений интоксикации тетрахлорметаном. Исследовано влияние включения высушенных ягод голубики, а также продуктов питания на основе хлеба и творога с включением в их рецептуру высушенных ягод голубики на показатели белкового обмена и оксидантного баланса в плазме крови крыс при интоксикации тетрахлорметаном. Биологический эффект включения порошка из ягод голубики достигался заменой эквивалентной части стандартного рациона вивария на высушенные ягоды голубики и обогащёнными порошком ягод голубики белый хлеб и творог в течение 14 дней. Все животные были распределены на двенадцать групп, шесть из которых оставались интактными и шесть групп животных, для которых моделировали общую интоксикацию организма путём подкожного введения 66%-го раствора тетрахлорметана. Контрольную группу составили животные, содержащиеся на стандартном рационе вивария. Установлено, что добавка в рацион питания ягод голубики, как в свободном виде, так и в составе функциональных продуктов питания оказывает существенное положительное влияние на метаболизм. Включение ягод голубики в рацион питания при введении тетрахлорметана в значительной мере снижает выраженность проявлений интоксикации, что проявлялось в более высоких значениях коэффициента Де Ритиса и низкой концентрации среднемолекулярных пептидов и ТБК-активных продуктов. Для снижения проявлений интоксикации наиболее эффективно применение обогащённого творога, что подтверждается наибольшими показателями по сравнению с группой, находящейся на рационе вивария, коэффициента Де Ритиса на 39,6% ($p < 0,001$), общего белка на 39,8% ($p < 0,001$), аскорбиновой кислоты в 3,12 раза, общей антиоксидантной активности на 29,6% ($p < 0,001$) и наименьшими показателями среднемолекулярных пептидов на 19,1% ($p < 0,001$), ТБК-активных продуктов на 35,2% ($p < 0,001$).

Ключевые слова: питание, пищевые добавки, метаболизм, антиоксиданты, тетрахлорметан, общая интоксикация, свободно-радикальное окисление.

The effect of dried blueberries and food products enriched with them on metabolic parameters of carbon tetrachloride intoxication

© 2022. A. V. Elikov¹ ORCID: 0000-0002-3042-8556, P. I. Tsapok¹ ORCID: 0000-0002-9010-8327,
E. M. Karpova² ORCID: 0000-0002-4160-9440, D. B. Loktev² ORCID: 0000-0002-3786-7113,
V. A. Kozvonin^{1,3} ORCID: 0000-0002-2447-6949, L. N. Shmakova¹ ORCID: 0000-0003-2998-1909

¹Kirov State Medical University,
112, Karla Marksa St., Kirov, Russia, 610998,

²Limited liability company "Event",
5, Detskiy Pereulok, Saint-Petersburg, Russia, 195084,

³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: anton_yelikov@mail.ru

The aim of our study is to estimate the efficiency of using functional food supplements enriched with blueberry (*Vaccinium uliginosum* L.) powder to reduce carbon tetrachloride intoxication manifestations. The influence of the inclusion of dried blueberries on the indicators of protein metabolism, as well as food products based on bread and cottage cheese with the dried blueberries in their recipe, was investigated. Those parameters were evaluated by the content of total protein, medium molecular peptides, De Rittis coefficient and oxidative balance (assessed by the content of TBA-active products, ascorbic acid and total antioxidant activity index) in the blood plasma in rats intoxicated with carbon tetrachloride. The biological effect of including blueberry powder was achieved by replacing an equivalent part of the standard vivarium diet with dried blueberries, white bread and cottage cheese enriched with blueberry powder for 14 days. All animals were divided into twelve groups, six of which remained intact and six were simulated total body intoxication by subcutaneous injection of 66% tetrachloromethane solution. The control group consisted of animals kept on a standard vivarium diet. It has been established that the addition of blueberries to the diet both in a free form and as a part of the functional foods has a significant positive effect on the metabolism. It is confirmed by studying the protein exchange state (increasing values of total protein and decreasing of average molecular peptides) and the oxidant balance (decreasing the concentration of TBA-active products, increasing of ascorbic acid and total antioxidant activity). Inclusion of blueberries in the diet during the introduction of carbon tetrachloride significantly reduces the severity of intoxication, which was expressed in higher values of De Rittis coefficient and lower concentration of medium molecular peptides and TBA-active products. Using enriched cottage cheese is the most effective way to reduce the manifestations of intoxication. It is confirmed by changes of indicators' level in comparison with the vivarium ration group: the De Rittis coefficient is increased by 39.6% ($p < 0.001$), total protein – by 39.8% ($p < 0.001$), ascorbic acid – by 3.12 times, total antioxidant activity – by 29.6% ($p < 0.001$). The indicators of average molecular peptides are decreased by 19.1% ($p < 0.001$), TBA-active products – by 35.2% ($p < 0.001$).

Keywords: nutrition, food supplements, metabolism, antioxidants, carbon tetrachloride, general intoxication, free-radical oxidation.

Состояние общей интоксикации может развиваться при воздействии на организм на производстве, а также в быту неблагоприятных экологических факторов и химически активных соединений: природных ядов, пестицидов, радионуклидов, полициклических ароматических углеводородов, нитрозаминов, табачного дыма, смога, высоких доз алкоголя, продуктов метаболизма некоторых лекарственных препаратов [1–4]. В ряде работ доказано канцерогенное влияние галогенсодержащих органических веществ [5, 6]. Механизмы действия различных токсических веществ на организм многообразны, но все они связаны с нарушением дезинтоксикационной функции печени [7]. Продукты свободнорадикальных реакций, образующиеся в процессах липопероксидации, нейтрализуются биоантиоксидантами: биофлавоноидами, полифенолами и токоферолами, действие которых может быть усилено серосодержащими аминокислотами (цистеином и метионином), витаминами антиоксидантного действия А и С, а также β -каротином [8]. В настоящее время в качестве перспективного источника естественных биоантиоксидантов в России можно рассматривать дикорастущие ягоды, превосходящие по содержанию биологически активных соединений ягоды, выработанные промышленным способом, в числе которых голубика. Дикорастущая голубика является источником аскорбиновой кислоты и биофлавоноидов. Источником цистеина и метионина в повседневном питании являются, в том числе, хлеб и молочные продукты. Творог явля-

ется источником витамина А. Таким образом, составные продукты питания на основе хлеба и творога с добавлением ягод голубики имеют повышенную пищевую ценность и лечебно-профилактические свойства.

Целью работы было оценить эффективность использования функциональных продуктов питания, обогащённых порошком ягод голубики (*Vaccinium uliginosum* L.), для снижения проявлений общей интоксикации, вызванной тетрахлорметаном.

Объекты и методы исследования

Образцы голубики собраны в Белохолуницком районе Кировской области. Аскорбиновую кислоту (АК) в высушенных ягодах голубики определяли методом экстракции с раствором хлороводородной кислоты и титрования экстракта краской Тильманса (ГОСТ 24556-89 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С»). Биофлавоноиды (БФ) в пересчёте на кверцетин в высушенных ягодах голубики определяли фотометрически. Метод основан на экстракции биофлавоноидов из сырья этиловым спиртом с последующим спектрофотометрическим измерением при длине волны 410 нм [9]. Высушивание ягод голубики осуществляли в инфракрасной сушильной камере при температуре 75 °С. Порошок из ягод голубики получали путём размалывания высушенных ягод на роторной мельнице до мелкодисперсного состояния. Полученный порошок добавляли в тесто перед выпечкой

хлеба. Творожный продукт получали путём смешивания порошка из ягод голубики с творогом жирностью 9%. Количество порошка из ягод голубики в хлебе и твороге определяли на основе органолептических исследований данных обогащённых продуктов.

Экспериментальные исследования проведены в соответствии с международными правилами правовых и этических норм использования животных на 60-ти половозрелых беспородных крысах-самцах, массой тела 240–260 г. Результаты сравнивали с контролем. Распределение животных по группам было следующим: шесть групп интактных животных, по пять животных в группе получавших стандартный рацион вивария, белый хлеб, творог, голубику, белый хлеб с добавлением голубики и творог с добавлением голубики, и шесть групп животных по пять животных в группе с аналогичным рационом, для которых моделировали общую интоксикацию организма посредством подкожного введения через день (7 раз за 14 дней) в область бедра с внутренней стороны (чередую справа и слева) 66%-го раствора тетрахлорметана (CCl_4) в рафинированном оливковом масле в дозе 0,5 мл на каждое животное [10]. Экспериментальные животные имели свободный доступ к корму и воде для питья. Все группы контрольных животных содержались на следующих рационах: 1-я (контроль) – животные на стандартном рационе вивария (гранулированный корм), 2-я – стандартный рацион вивария с добавлением белого хлеба (12 г в сутки на одно животное), 3-я – стандартный рацион вивария с добавлением творога (6 г в сутки на одно животное), 4-я – стандартный рацион вивария с добавлением высушенных ягод голубики (0,3 г в сутки на одно животное), 5-я – стандартный рацион вивария с добавлением хлеба с голубикой (12 г в сутки на одно животное с содержанием порошка из ягод голубики в расчёте 2 г/100 г продукта), 6-я – стандартный рацион вивария с добавлением творога с голубикой (6 г в сутки на одно животное с содержанием порошка из ягод голубики в расчёте 7 г/100 г продукта). Распределение экспериментальных групп крыс с 7-й по 12-ю группы было аналогичным образом, но с моделированием интоксикации введением раствора CCl_4 . Животных выводили из эксперимента путём декапитации в состоянии кратковременного эфирного наркоза на 14-й день эксперимента. Забор крови у животных осуществляли в момент декапитации в центрифужные пробирки с антикоагулян-

том, по 7–10 мл крови от каждого животного. В качестве антикоагулянта использовали раствор этилендиаминтетрауксусной кислоты из расчёта 1 мг антикоагулянта на 1 мл крови. Цельную кровь центрифугировали при 3000 об./мин в течение 15 мин. Биохимические исследования проводили в плазме крови. Содержание общего белка (ОБ) определяли унифицированным биуретовым методом стандартным набором реактивов «ОЛЬВЕКС диагностикум» (Россия), содержание среднемолекулярных пептидов (СП) – по методу [11]. Для изучения процессов свободнорадикального окисления (СРО) определяли содержание ТБК-активных (TBK_{an}) продуктов (ТБК – тиобарбитуровая кислота), спектрофотометрически при длине волны 535 нм на спектрофотометре SHIMADZU 1240 (Япония). Для определения первичных продуктов СРО измеряли интенсивность хемилюминесценции (ХЛ), инициированной пероксидом водорода, в присутствии избытка ионов двухвалентного железа, за 30 (S30) и 60 (S60) секунд, а также максимальную вспышку ХЛ (I_m) за исследуемое время на хемилюминометре Emilite 1105 (Россия). Оценку общей антиоксидантной активности (ОАА) осуществляли хемилюминесцентным методом, посредством определения соотношения уровня максимальной вспышки/светосумма за 30 с ($I_m/S30$). Содержание АК определяли колориметрическим методом с динитрофенилгидразиновым реактивом. В работе использован модифицированный метод определения АК и СП в одной пробе [12]. Активность аспаратаминотрансферазы (АСТ) (К.Ф. 2.6.1.1) и аланинаминотрансферазы (АЛТ) (К.Ф. 2.6.1.2) с расчётом коэффициента Де Ритиса (КР) определяли стандартным набором реактивов «Lachema» (Чехия).

Полученные экспериментальные данные обработаны методом описательной статистики с использованием программы Statistica 10.0. с определением среднего арифметического и стандартной ошибки среднего ($M \pm m$). После проверки на нормальность распределения с помощью критерия Шапиро-Уилка достоверность разницы определяли по *t*-критерию Стьюдента. Различия считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В процессе эксперимента у крыс не отмечено отказа от корма и питья. У отдельных животных с моделированием интоксикации отмечено снижение подвижности (угнетение) в течение эксперимента, в месте введения

Таблица 1 / Table 1
Содержание аскорбиновой кислоты и биофлавоноидов в высушенных ягодах голубики ($M \pm m$)
Content of ascorbic acid and bioflavonoids in dried blueberries ($M \pm m$)

Показатель Indicator	Высушенные ягоды голубики Dried blueberries
Аскорбиновая кислота, мг/100 г Ascorbic acid, mg/100 g	87,0±1,8
Биофлавоноиды, в пересчёте на кверцетин, мг/100 г Bioflavonoids, in terms of quercetin, mg/100 g	180,0±4,0

Таблица 2 / Table 2
Метаболические маркеры гепатотоксичности в зависимости от рациона питания ($M \pm m; n = 5$)
Metabolic markers of hepatotoxicity depending on the diet ($M \pm m; n = 5$)

№/№ No./ No.	Группа по рациону Groups by diet	Исследуемый показатель / Studied indicator					
		коэффициент Де Ритиса (АСТ/АЛТ), у. е. De Ritis coefficient (AST/ALT), с. у.		средне- молекулярные пептиды ($E_{254} \times 1000$) medium molecular peptides ($E_{254} \times 1000$)		общий белок, г/л total protein, g/L	
		интакт. intact.	+ CCl ₄	интакт. intact.	+ CCl ₄	интакт. intact.	+ CCl ₄
1/7	Контроль Control	1,42± 0,02	0,48± 0,01*	289,8± 7,0	575,4± 13,1*	71,68± 1,49	47,82± 3,00*
2/8	Хлеб Bread	1,45± 0,02	0,48± 0,02*	284,4± 8,5	576,2± 15,5*	72,29± 1,10	52,17± 1,71*
3/9	Творог Cottage cheese	1,40± 0,01	0,54± 0,03*	269,6± 6,0	517,8± 21,0*#	78,20± 1,16*	59,24± 2,41*#
4/10	Голубика Blueberries	1,41± 0,03	0,56± 0,03*#	256,8± 10,6*	501,4± 14,9*#	78,63± 2,53*	56,79± 3,20*
5/11	Хлеб с голубикой Bread with blueberries	1,40± 0,02	0,59± 0,03*#	271,6± 5,6	528,2± 13,7*#	74,46± 2,63	59,19± 3,50*#
6/12	Творог с голубикой Cottage cheese with blueberries	1,40± 0,03	0,67± 0,02*#	230,2± 4,7*	465,6± 12,5*#	77,62± 1,86*	66,87± 2,78#

Примечания: * – статистически значимые различия по сравнению с контрольной группой на стандартном рационе вивария ($p < 0,05$); # – статистически значимые различия по сравнению с контрольной группой на стандартном рационе вивария с моделированием интоксикации CCl₄ ($p < 0,05$).

Notes: * – statistically significant differences compared with the control group on the standard vivarium diet ($p < 0.05$); # – statistically significant differences in comparison with the control group on the standard vivarium diet with modeling of CCl₄ intoxication ($p < 0.05$).

раствора CCl₄ наблюдалось образование воспалительного инфильтрата, некротических изменений не отмечалось.

Результаты определения, с учётом погрешности метода, АК и БФ в высушенных ягодах голубики представлены в таблице 1.

Согласно полученным данным, дикорастущую голубику можно считать богатым источником аскорбиновой кислоты и биофлавоноидов.

Считается, что состояние белкового обмена достоверно отражает функциональное состояние печени и организма в целом [13–15]. Нами исследованы показатели, характеризующие как степень общей интоксикации организ-

ма, так и выраженность гепатоксического действия введения раствора CCl₄. Результаты представлены в таблице 2.

Установлено положительное влияние ягод голубики и обогащённых порошком ягод продуктов питания на белковый обмен, что проявлялось в снижении у интактных животных содержания СП и увеличении содержания ОБ. При этом наиболее значимое положительное влияние обнаружено в группе животных с включением в рацион питания обогащённого творога. В то же время у интактных животных включение ягод голубики и обогащённых продуктов питания не оказы-

Таблица 3 / Table 3

Метаболические маркеры состояния оксидантного баланса в зависимости от рациона питания ($M \pm m$; $n = 5$) / Metabolic markers of the oxidative balance state depending on the diet ($M \pm m$; $n = 5$)

№/№ No./ No.	Группа по рациону Groups by diet	Исследуемый показатель / Studied indicator					
		ТБК _{ан} , нмоль/мл ТВА _{ап} , nmol/mL		аскорбиновая кислота, мг/л ascorbic acid, mg/L		общая антиоксидантная активность, (Im/S30), у. е. total antioxidant activity, (Im/S30), с. у.	
		интакт. intact.	+ CCl ₄	интакт. intact.	+ CCl ₄	интакт. intact.	+ CCl ₄
1/7	Контроль Control	2,58± 0,18	12,06± 0,35*	17,73± 0,52	4,12± 0,38*	0,086± 0,002	0,054± 0,001*
2/8	Хлеб Bread	2,42± 0,17	11,45± 0,63*	18,67± 1,06	4,34± 0,54*	0,086± 0,003	0,055± 0,002*
3/9	Творог Cottage cheese	2,20± 0,14	10,34± 0,61*#	20,39± 0,42*	6,03± 0,69*#	0,090± 0,003	0,059± 0,002*#
4/10	Голубика Blueberries	2,13± 0,20	8,95± 0,48*#	21,17± 0,79*	8,46± 0,95*#	0,093± 0,003	0,063± 0,002*#
5/11	Хлеб с голубикой Bread with blueberries	2,34± 0,11	9,13± 0,58*#	20,23± 0,53*	10,74± 0,82*#	0,088± 0,001	0,062± 0,003*#
6/12	Творог с голубикой Cottage cheese with blueberries	1,93± 0,12*	7,81± 0,24*#	21,64± 0,95*	12,87± 0,82*#	0,097± 0,003*	0,070± 0,002*#

Примечания: * – статистически значимые различия по сравнению с контрольной группой на стандартном рационе вивария ($p < 0,05$); # – статистически значимые различия по сравнению с контрольной группой на стандартном рационе вивария с моделированием интоксикации CCl₄ ($p < 0,05$).

Notes: * – statistically significant differences compared with the control group on the standard vivarium diet ($p < 0.05$); # – statistically significant differences in comparison with the control group on the standard vivarium diet with modeling of CCl₄ intoxication ($p < 0.05$).

вает заметного влияния на активность АСТ, АЛТ и величину КР.

Интоксикация CCl₄ оказывала выраженное негативное влияние на функциональное состояние печени и организма в целом, что выражалось в соответствующих изменениях показателей белкового обмена. Так, синдром цитолиза гепатоцитов проявлялся в достоверном снижении величины КР у животных 7-й группы в 2,96 раза, нарушения дезинтоксикационной функции печени – в увеличении содержания СП в 1,99 раза, а нарушения синтетической функции печени – в снижении содержания ОБ на 32,9% ($p < 0,001$). Применение ягод голубики в рационе питания, а также обогащённых продуктов существенно снижало проявления интоксикации, что проявлялось в статистически значимой разнице всех исследуемых показателей белкового обмена между 7-й и с 10-й по 12-ю группами. Следует отметить высокую эффективность включения в рацион творога, особенно в сочетании с порошком ягод голубики, подтверждаемую исследованием всех показателей белкового обмена. Данное явление объясняется поступлением с творогом

большого количества полноценного белка с высоким содержанием метионина, что оказывает существенное влияние на синтетическую и дезинтоксикационную функцию печени и, в конечном счёте, приводит к снижению проявлений синдрома цитолиза, выражающееся в статистически значимой тенденции к более высоким (на 12,5%; $p = 0,058$) значениям КР у животных 9-й группы по сравнению с 7-й. При этом следует отдельно подчеркнуть положительную роль использования в составе творога добавки порошка из ягод голубики, подтверждаемую достоверно более высокими значениями КР на 24,1% ($p = 0,007$) у крыс 12-й группы по сравнению с 9-й.

Известно, что интоксикации различного генеза сопровождаются значительной активацией СРО на фоне снижения ресурсов антиоксидантной защиты, поэтому показатели, характеризующие состояние оксидантного баланса, являются надёжными критериями выраженности поражения организма различными токсическими веществами [16–18]. В нашей работе состояние оксидантного баланса оценивалась по содержанию ТБК_{ан}, АК

и величине ОАА. Результаты исследования представлены в таблице 3.

Установлено положительное влияние на состояние оксидантного баланса интактных животных добавки в рацион ягод голубики и их порошка, наиболее выраженное у крыс 6-й группы, что подтверждается более низким, по сравнению с контролем, показателем $TBK_{ан}$ и более высокими показателями АК и ОАА. Следует отметить, что в отличие от человека, в организме крыс возможен синтез АК. Это необходимо учитывать для правильной интерпретации полученных результатов. В частности, более высокое содержание АК в плазме крови животных с 4-й по 6-ю групп можно объяснить двумя главными факторами: поступлением дополнительного количества АК с ягодами голубики; экономией расходования АК в реакциях СРО в организме экспериментальных животных за счёт антиоксидантных свойств антоцианов и биофлавоноидов, содержащихся в ягодах голубики в значительных количествах.

Кроме того, для животных 6-й группы возможно повышение содержания АК за счёт увеличения синтеза ферментов, отвечающих за процесс её биосинтеза, вследствие поступления дополнительных количеств полноценного белка с творогом.

Полученная закономерность влияния на состояние оксидантного баланса ягод голубики и обогащённых продуктов питания в целом сохраняется в экспериментах по моделированию интоксикации CCl_4 и согласуется с результатами исследования белкового обмена. В частности, на фоне существенных нарушений оксидантного баланса (накопление $TBK_{ан}$, снижение показателей АК и ОАА), вызванного введением CCl_4 , показатель $TBK_{ан}$ в плазме крови животных 12-й группы по сравнению с 7-й ниже на 35,2% ($p < 0,001$), содержание АК выше в 3,12 раза, а величина ОАА выше на 29,6% ($p < 0,001$). Кроме того, следует отметить более высокую эффективность в плане коррекции оксидантного баланса обогащённого творога по сравнению с хлебом, что также можно связать с поступлением дополнительных количеств полноценного белка и увеличением синтетической функции печени. Таким образом, результаты исследования обосновывают применение продуктов антиоксидантно-белковой направленности, например, обогащённого творога в качестве возможного лечебного питания в ситуациях, связанных с различными интоксикациями вследствие воздействия неблагоприятных факторов внешней среды.

Заключение

Добавка в рацион питания ягод голубики (*Vaccinium uliginosum* L.) как в свободном виде, так и составе функциональных продуктов питания оказывает существенное положительное влияние на метаболизм, что подтверждается результатами исследования состояния белкового обмена и оксидантного баланса. Включение ягод голубики в рацион питания при моделировании общей интоксикации тетрахлорметаном в значительной мере снижает выраженность негативных лабораторных показателей, отражающих функциональное состояние печени. Для снижения проявлений интоксикации наиболее эффективно применение творога, обогащённого порошком ягод голубики, что подтверждается наибольшими показателями по сравнению с группой, находящейся на рационе вивария, коэффициента Де Ритиса на 39,6% ($p < 0,001$), общего белка на 39,8% ($p < 0,001$), аскорбиновой кислоты в 3,12 раза, общей антиоксидантной активности на 29,6% ($p < 0,001$) и наименьшими показателями среднемолекулярных пептидов на 19,1% ($p < 0,001$), TBK -активных продуктов на 35,2% ($p < 0,001$). Настоящее исследование позволяет дать обоснованные рекомендации по включению ягод голубики в состав лечебно-профилактического питания при интоксикациях различного генеза.

References

1. Azyamov M.A., Shirokikh A.A., Ashikhmina T.Ya. The toxicity comparison of antitumor substances: the mushroom *Hericum erinaceus* BP 16 polysaccharides, dialderon and metothrexate // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 4. P. 142–149 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-142-149
2. Lim D.S., Roh T.H., Kim M.K., Kwon Y.C., Choi S.M., Kwack S.J., Kim K.B., Yoon S., Kim H.S., Lee B.M. Risk assessment of N-nitrosodiethylamine (NDEA) and N-nitrosodiethanolamine (NDELA) in cosmetics // J Toxicol Environ Health Part A. 2018. V. 81. No. 12. P. 465–480. doi: 10.1080/15287394.2018.1460782
3. Corrao G., Bagnardi V., Zamboni A., La Vecchia C. A meta-analysis of alcohol consumption and the risk of 15 diseases // Preventive Medicine. 2004. V. 38. No. 5. P. 613–619. PubMed: 15066364
4. Oborin V.A., Ashikhmina T.Ya. Experimental substantiation of the possibility of using red blood cells as a model for studying the membrane damaging effect of nanoparticles // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 176–181 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-176-181

5. Włodarczyk-Makula M., Wiśniowska E. Halogenated Organic Compounds in Water and in Wastewater // Civil and Environmental Engineering Reports. 2019. V. 29. No. 4. P. 236–247. doi: 10.2478/ceer-2019-0057
6. Kodavanti P., Loganathan B. Organohalogen Pollutants and Human Health. Chapter 12. Encyclopedia of Public Health. Amsterdam: Elsevier, 2017. P. 359–366.
7. Sources and targets of free radicals in human blood / Ed. Yu.A. Vladimirov. Moskva: MAX-Press Publ, 2017. 304 p. (in Russian).
8. Medical Toxicology. National Guide / Ed. E.A. Luzhnikov. Association of Clinical Toxicology. Moskva: GEOTAR-Media Publ, 2012. 923 p. (in Russian).
9. Mar'in A.A., Kalinkina G.I. Development of methods for standardization of cardiovascular collection "Cardizid" // Khimiya rastitelnogo syrya. 2005. No. 1. P. 37–40 (in Russian).
10. Solopayev B.P. Regeneration of normal and pathologically changed liver. Gorkii: Volgo-Vyatskoe knizhnoe izdatelstvo, 1980. 239 p. (in Russian).
11. Gabrielyan I.I., Lipatova V.I. Experience of using the indicator of average molecules in blood for diagnosis of nephrological diseases in children // Laboratornoe delo. 1984. No. 3. P. 138–140 (in Russian).
12. Tsapok P.I., Elikov A.V., Borodulin O.V., Rysik I.O. Method for determination of medium molecules and ascorbic acid in one sample // Inf. Sheet of Kirov CNTI No. 89–97. Kirov, 1997. 3 p. (in Russian).
13. Gorokhova L.G., Mikhailova N.N., Zhukova A.G., Logunova T.D. Pre-clinical evaluation of metabolic and morphological changes in the body induced by 4-chloro-benzhydryl piperazine intoxication // Hygiene and Sanitation. 2020. V. 99. No. 7. P. 745–749 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-7-745-749
14. Al Amin A.S.M., Menezes R.G. Carbon tetrachloride toxicity // Review from StatPearls Publishing, Treasure Island (FL). PubMed: 32965851 [Internet resource] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562180/> (Accesses: 02.12.2021).
15. Shameenii A., Thanabal P.P., Vun-Sang S., Iqbal M. Hepatoprotective effects of *Pandanus amaryllifolius* against carbon tetrachloride (CCl₄) induced toxicity: A biochemical and histopathological study // Arabian Journal of Chemistry. 2021. V. 14. No. 10. Article No. 103390. doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103390
16. Fedoriv O.Ye., Kopach A.Ye., Melnik N.A. Impact of lead acetate and sodium and potassium stearates on lipid peroxidation processes in the body of experimental animals // Hygiene and Sanitation. 2021. V. 100. No. 4. P. 406–410 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-4-406-410
17. Knockaert L., Berson A., Ribault C., Prost P.E., Fautrel A., Pajaud J., Lepage S., Lucas-Clerc C., Bégué J.-M., Fromenty B., Robin M.-A. Carbon tetrachloride-mediated lipid peroxidation induces early mitochondrial alterations in mouse liver // Laboratory Investigation. 2012. V. 92. No. 3. P. 396–410. doi: 10.1038/labinvest.2011.193
18. Basu S. Carbon tetrachloride-induced lipid peroxidation: eicosanoid formation and their regulation by antioxidant nutrients // Toxicology. 2003. V. 189. No. 1–2. P. 113–127. doi: 10.1016/s0300-483x(03)00157-4

**Определение показателей окислительного стресса
в мялиссе лекарственной при действии микромицета
Fusarium culmorum и его антагонистов**

© 2022. А. И. Фокина¹, к. б. н., доцент, С. Г. Скугорева², к. б. н., н. с.,
Л. В. Трефилова³, к. б. н., доцент, Л. В. Даровских¹, к. п. н., доцент,

¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
e-mail: annushka-fokina@mail.ru

На качество лекарственного растительного сырья, в частности мялиссе лекарственной *Melissa officinalis* L., большое влияние оказывает содержание биологически активных веществ, зависящее от окислительно-восстановительного баланса внутри клеток. Смещение баланса возможно в результате окислительного стресса, вызванного неблагоприятными факторами. Стресс-фактором, в частности, могут быть фитотоксины, которые выделяет распространённый в почве микромицет *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.

Целью работы было изучить содержание антиоксидантов и накопление малонового диальдегида в растениях мялиссе лекарственной при внесении в питательный грунт фитопатогенного микромицета *F. culmorum* и его антагонистов (*Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. 300 и *Trichoderma viride* Pers.). Для подтверждения корректности используемых методов анализа была проведена их валидация в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Для оценки применимости методов кулонометрического определения суммы антиоксидантов и спектрофотометрического определения фенольных соединений (ФС) в спиртовых вытяжках из мялиссе выполнена валидация методик анализа. Показано, что их статистические характеристики в целом удовлетворяют критериям приемлемости валидационных параметров (линейность, повторяемость и правильность), представленным в отечественной и зарубежной нормативной документации и литературе.

Присутствие в грунте *F. culmorum* приводило к накоплению малонового диальдегида (МДА) в листьях мялиссе в количествах, превышающих контроль в 1,8 раза. В ответ на действие окислительного стресса происходит усиленный синтез антиоксидантов: в спиртовом экстракте из мялиссе количество суммы антиоксидантов увеличивается в 1,1–1,6 раза, ФС – в 1,2–1,8 раза по сравнению с контролем. Установлена прямая корреляционная зависимость между содержанием ФС и МДА ($r = 0,69$), ФС и суммой антиоксидантов ($r = 0,84$), МДА и суммой антиоксидантов ($r = 0,69$), что указывает на активацию антиоксидантной системы растений (накопление антиоксидантов, в том числе ФС) в условиях окислительного стресса. Внесение в грунт микробов-антагонистов *F. muscicola* и *T. viride* позволяет ослабить воздействие фитопатогена.

Ключевые слова: мялисса лекарственная, фитопатогены, антагонисты, окислительный стресс, антиоксиданты, фенольные соединения, валидация методик.

**Determination of oxidative stress indicators
in *Melissa officinalis* under the action of micromycete
Fusarium culmorum and its antagonists**

© 2022. A. I. Fokina¹ ORCID: 0000-0001-8265-8882, S. G. Skugoreva² ORCID: 0000-0002-5902-5187

L. V. Trefilova³ ORCID: 0000-0002-9932-5803, L. V. Darovskikh¹ ORCID: 0000-0001-5868-102X

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

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

The quality of medicinal plant materials, in particular lemon balm *Melissa officinalis* L., is greatly influenced by the content of biologically active substances, which depends on the redox balance inside the cells. A balance shift is possible as a result of oxidative stress caused by adverse factors. The stress factor, in particular, may be phytotoxins, which are secreted by the micromycete *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc., which is widespread in the soil.

The aim of the work was to study the content of antioxidants and the accumulation of malondialdehyde in lemon balm plants when the phytopathogenic micromycete *F. culmorum* and its antagonists (*Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. 300 и *Trichoderma viride* Pers.) are introduced into the nutrient soil. To assess the applicability of the methods of coulometric determination of the amount of antioxidants and spectrophotometric determination of phenolic compounds (PC) in alcohol extracts from lemon balm, the methods were validated. It is shown that their statistical characteristics generally satisfy the acceptance criteria for validation parameters (linearity, repeatability and correctness) presented in domestic and foreign regulatory documentation and literature.

The presence of *F. culmorum* in the soil led to the accumulation of malondialdehyde (MDA) in lemon balm leaves in amounts exceeding the control by 1.8 times. In response to the action of oxidative stress, an increased synthesis of antioxidants occurs: in the alcoholic extract from lemon balm, the amount of antioxidants increases by 1.1–1.6 times, PC by 1.2–1.8 times compared with the control. A direct correlation was established between the content of PC and MDA ($r = 0.69$), PC and the amount of antioxidants ($r = 0.84$), MDA and the amount of antioxidants ($r = 0.69$), which indicates the activation of the antioxidant system of plants (accumulation of antioxidants, including PC) under conditions of oxidative stress. The introduction of microorganisms-antagonists of *F. muscicola* and *T. viride* into the soil makes it possible to weaken the impact of the phytopathogen.

Keywords: lemon balm, phytopathogens, antagonists, oxidative stress, antioxidants, phenolic compounds, method validation.

Мелисса лекарственная (*Melissa officinalis* L.) – многолетнее травянистое растение, которое широко используется в медицине благодаря содержанию в ней большого количества биологически активных веществ (БАВ): флавоноидов, дубильных веществ, витаминов, антиоксидантов [1]. Под действием неблагоприятных факторов среды может происходить изменение состава БАВ и ценности лекарственного сырья. Одним из таких факторов является наличие некоторых групп микроорганизмов (МО) в среде выращивания, в частности, фитопатогенного микромицета рода *Fusarium*, способного выделять в окружающую среду различные токсины.

Ведущим механизмом негативного влияния микромицета на растения является окислительный стресс, который основан на генерации избыточного количества активных форм кислорода (АФК). Они образуются в результате электронного возбуждения или окислительно-восстановительных превращений O_2 , являются необходимой и неотъемлемой частью метаболизма живых клеток всех аэробных организмов. Избыточное накопление АФК опасно для клетки, так как они способны взаимодействовать с биомолекулами и индуцировать развитие окислительного стресса [2].

В живых организмах существует большая группа веществ-антиоксидантов, способных снижать агрессивное действие АФК. К ним от-

носятся фенольные соединения (ФС) – большая группа веществ ароматической природы с высокой окислительно-восстановительной активностью. Антиоксидантные свойства ФС обусловлены наличием соединённых с ароматическим ядром гидроксильных групп, легко отдающих атом водорода при взаимодействии со свободными радикалами. Понимание функционирования антиоксидантной системы необходимо для поиска оптимальных условий для выращивания мелиссы лекарственной.

Кроме использования внутреннего потенциала растений для борьбы с окислительным стрессом, вызванным патогенным микромицетом р. *Fusarium*, хорошим биотехнологическим приёмом может стать использование микробов-антагонистов.

В настоящее время в научной литературе крайне мало информации о влиянии различных факторов на антиоксидантную систему лекарственных растений, несмотря на то, что работа этой системы играет одну из ключевых ролей в формировании качества сырья.

Целью работы было изучить содержание антиоксидантов и накопление малонового диальдегида в растениях мелиссы лекарственной при внесении в питательный грунт фитопатогенного микромицета *Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc. и его антагонистов (*Fischerella muscicola* (Thur.) Gom. 300 и *Trichoderma viride* Pers.). Для подтверждения корректности используемых методов

анализа была проведена их валидация в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Объекты и методы исследования

Валидация методик определения антиоксидантов в растениях. Валидацию методик проводили согласно [3–4], информации из статей ведущих международных и российских научных журналов [5–10].

Определение фенольных соединений спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина-Чокальтеу. Для определения ФС использовали экстракт объёмом 0,5 мл, приготовленный из навески высушенных листьев Melissa массой 0,1 г (точная навеска) и 25,0 мл 70%-го этилового спирта нагреванием на кипящей ($t = 94 \pm 2$ °C) водяной бане в течение 2 ч (здесь и далее термин «точная навеска» означает взвешивание на аналитических весах с погрешностью $\pm 0,0002$ г согласно документу ОФС.1.1.0001.15 «Правила пользования фармакопейными статьями»). Анализ основан на спектрофотометрическом определении ФС после их реакции с реактивом Фолина-Чокальтеу при длине волны 765 нм. Реактив Фолина-Чокальтеу представляет из себя молибдофосфоровольфрамную гетерополиоксидную кислоту ($3\text{H}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-13\text{WO}_3-5\text{MoO}_3-10\text{H}_2\text{O}$). Последовательность обратимых одно- или двухэлектронных реакций восстановления молибдена приводят к синему окрашиванию раствора: Mo(VI) (жёлтый) + $e^- \rightarrow \text{Mo(V)}$ (синий) [11].

Валидационные характеристики методики – линейность (шесть уровней концентраций полифенолов: 20, 60, 100, 140, 200 и 300% от номинального значения – 2,6 мг/л, $n = 2$); повторяемость ($n = 6$); правильность, определённая методом «введено-найденно» (три уровня концентраций добавок: 0,4; 0,8 и 1,6 мг/л) за счёт добавления раствора галловой кислоты (внутренний стандарт) к экстракту из Melissa, $n = 3$.

Определение антиоксидантной активности методом кулонометрического титрования. Использовали экстракт объёмом 0,2 мл, приготовленный из навески высушенных листьев Melissa массой 0,1 г (точная навеска) и 10,0 мл водного раствора этилового спирта (1 : 1) в результате термостатирования при 37 °C в течение 2 ч. Анализ экстракта проводили на кулонометре «Эксперт-006» (Эжоникс-Эксперт, г. Москва) методом кулонометрического титрования бромом. Электро-

генерацию брома осуществляли из водного 0,2 М раствора бромида калия в 0,1 М растворе серной кислоты с определением конца титрования бипотенциометрической индикацией [12]. Валидационные характеристики: линейность (пять уровней концентраций антиоксидантов: 80, 90, 100, 110 и 120% от номинального значения массы антиоксидантов, в пересчёте на рутин, в аликвоте для ввода в ячейку кулонометра – 1,03 мг, $n = 3$); повторяемость ($n = 3$ при трёх уровнях концентраций); правильность, определённая методом «введено-найденно» (три уровня концентраций добавок рутин: 80, 100 и 120%).

Во всех расчётах значение величины доверительной вероятности принято $P \geq 0,95$. В качестве критерия приемлемости линейности ориентировались на значение $R \geq 0,99$, повторяемости – 5–10%.

Изучение состояния антиоксидантной системы растений Melissa. Семена Melissa лекарственной сорта Лимонный аромат протравливали 1%-м раствором перманганата калия. Проращивали в стерильных условиях в чашках Петри на увлажнённой дистиллированной водой фильтровальной бумаге в течение 7 сут, для того, чтобы в дальнейшем высаживать в почву только жизнеспособные растения.

Далее растения пересаживали в питательный грунт («Универсальный», г. Тверь, Россия), имеющий следующие агрохимические характеристики: pH 5,5–6,5; N – 50–150 мг/100 г; P(P_2O_5) – 100–250 мг/100 г; K(K_2O) – 150–300 мг/100 г. Предварительно грунт стерилизовали с помощью парового стерилизатора ГК-25-2 «ТЗМОИ»; условия стерилизации: рабочее давление 2,1+0,2 бар, температура 134 ± 3 °C, время стерилизационной выдержки – не менее 5+1 мин; проводили два цикла стерилизации. Перед посадкой растений в грунт вносили суспензии микромицетов *F. culmorum* ($T = (5,0 \pm 0,1) \cdot 10^9$ пропагул/мл, 1 мл на 60 г грунта), *T. viride* ($T = (5,0 \pm 0,1) \cdot 10^9$ спор/мл, 5 мл на 60 г грунта), а также ЦБ *F. muscicola* ($T = (3,0 \pm 0,1) \cdot 10^9$ кл./мл, 5 мл на 60 г грунта). Титр МО определяли с помощью камеры Горяева. Используются культуры МО из коллекции кафедры биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии Вятского агротехнологического университета (г. Киров).

Схема опыта: 1) контроль (без добавок МО); 2) *F. culmorum*; 3) *F. culmorum* + *F. muscicola*; 4) *F. culmorum* + *T. viride*; 5) *F. culmorum* + *F. muscicola* + *T. viride*. Исследования проводили при температуре 29 ± 3 °C, контроли-

ровали смену дня и ночи (12 ч/12 ч). Через 2 месяца после посадки растений определяли содержание ФС и суммы антиоксидантов (антиоксидантная активность – АОА) в листьях Melissa с помощью валидированных нами методик (ФС – спектрофотометрически с реактивом Фолина-Чекальтеу при $\lambda = 765$ нм, АОА – методом кулонометрического титрования бромом).

Содержание МДА в листьях Melissa определяли спектрофотометрически по интенсивности окраски комплекса вытяжки с тиобарбитуровой кислотой при $\lambda = 532$ нм [13].

Повторность опыта при выращивании растений четырёхкратная, аналитическая – трёхкратная. Статистическую обработку результатов проводили в программе Excel. В таблице представлены средние арифметические значения и ошибки средних. Достоверность различий с контролем оценивали по критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Результаты валидации методик анализа.

Результаты валидации методики определения ФС с реактивом Фолина-Чекальтеу по такому параметру как линейность показали, что уравнение зависимости величины оптической плотности от концентрации аналита выглядит так: $y = 0,1076x$, $R = 0,9985$ (рис. 1). Метроло-

гические характеристики повторяемости: $X_{\text{ср}}$ составило 2,4 мг/л, среднее квадратичное отклонение (СКО) – 0,3 мг/л, относительное СКО – 11,2%, $\Delta X = (СКО \cdot t) / \sqrt{n}$. Следует учитывать естественную неоднородность сырья из Melissa, которое обуславливает значение относительного СКО чуть выше значений (до 10%), чаще всего приводимых авторами различных статей как предел для лекарственного растительного сырья [6–9].

Результаты валидации методики кулонометрического определения АОА в экстрактах из Melissa лекарственной по такому параметру как линейность показали, что зависимость продолжительности титрования от содержания аналита в экстракте описывается уравнением $y = 25,922x$, $R = 0,992$ (рис. 2); повторяемость – относительное СКО составило максимально 4,4%, среднее СКО методики – 0,036 (табл. 1).

Кроме того, обе валидируемые методики признаются правильными, так как значения, принимаемые за истинные, лежат внутри доверительных интервалов соответствующих средних результатов анализов, полученных экспериментально по данным методикам. Статистически достоверных различий между введёнными и найденными количествами галловой кислоты при определении ФС и рутина при определении АОА не обнаружено (табл. 1, 2).

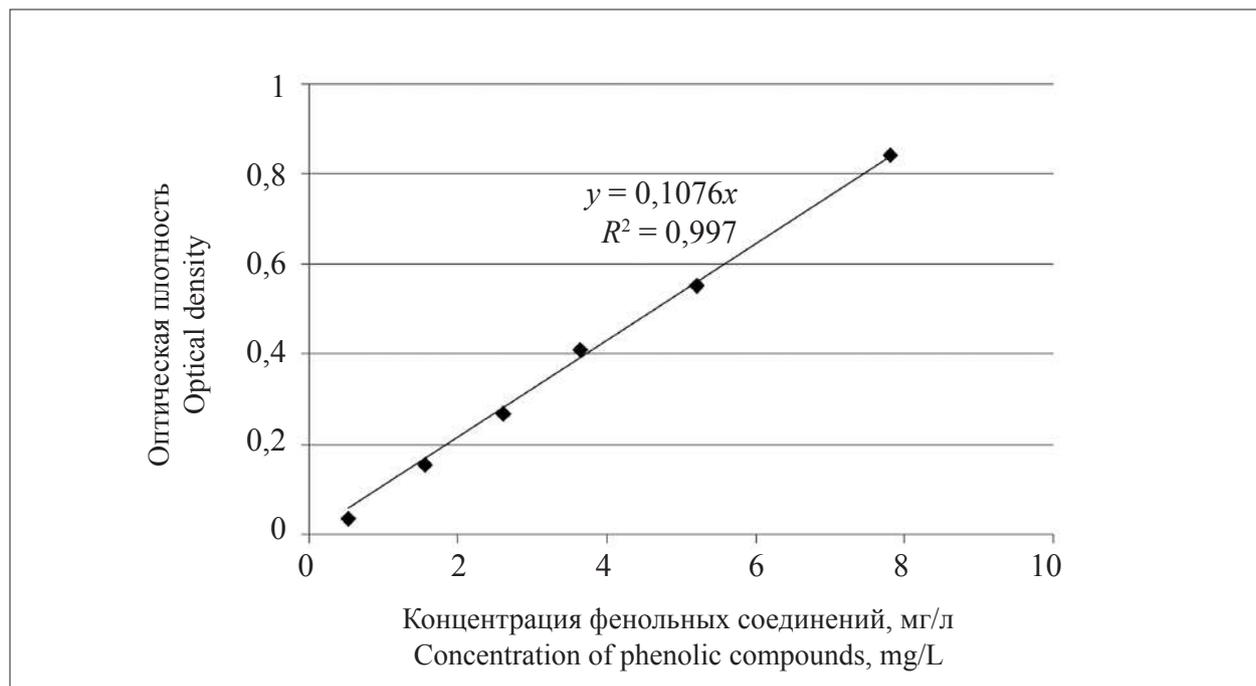


Рис. 1. Результаты валидации методики определения фенольных соединений с реактивом Фолина-Чекальтеу
Fig. 1. Results of the validation of the method for the determination of phenolic compounds with the Folin-Ciocalteu's reagent

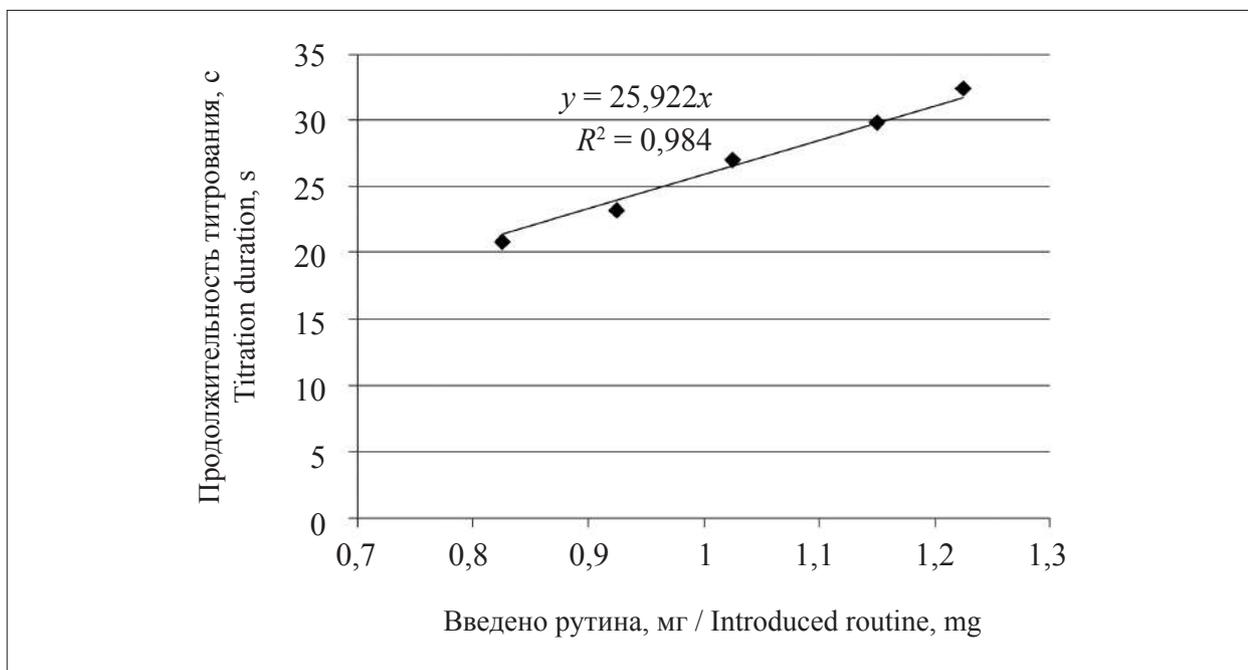


Рис. 2. График зависимости значения продолжительности кулонометрического титрования от содержания рутина, введённого в экстракт
Fig. 2. Graph of the dependence of the coulometric titration duration on the content of rutin introduced into the extract

Таблица 1 / Table 1

Метрологическая характеристика показателей правильности и повторяемости результатов определения антиоксидантной активности
 Metrological characteristics of indicators of correctness and repeatability of the results of determination of antioxidant activity

Введено рутина, мг / Introduced rutin, mg	Найдено рутина, мг / Found rutin, mg	СКО / Standard deviation (SD)	Относительное СКО, % / Relative SD	$\Delta X = (СКО \cdot t) / \sqrt{n}$ $\Delta X = (SD \cdot t) / \sqrt{n}$	S ²	СКО методики / Method SD
0,83	0,83	0,010	1,24	0,03	0,000100	0,036
1,03	1,07	0,029	2,70	0,07	0,000841	
1,24	1,28	0,055	4,30	0,14	0,003025	

Таблица 2 / Table 2

Данные для оценки правильности результатов определения фенольных соединений
 Data for assessing the correctness of the results of the determination of phenolic compounds

Введено галловой кислоты, мг/л / Added gallic acid, mg/L	Найдено галловой кислоты, мг/л / Found gallic acid, mg/L
0,40	0,46±0,13
0,80	0,61±0,20
1,60	1,36±0,38

Так как методики в целом валидны, они могут быть использованы в исследовании содержания антиоксидантов и ФС в мелиссе лекарственной.

В ходе исследования было выполнено 5 вариантов эксперимента, различающихся сочетанием внесённых в грунт МО, включая контроль (табл. 3).

Антиоксидантная система растений мелиссы. В результате исследования установлено, что фитопатоген *F. culmorum* вызывает окислительный стресс в клетках мелиссы, о чём свидетельствует накопление МДА, одного из конечных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) (табл. 3). Концентрация МДА в листьях мелиссы в варианте

№ 2 (с внесением в почву только *F. culmorum*) была в 1,8 выше, чем в контроле (вариант № 1). В вариантах с внесением в грунт МО-антагонистов (*F. muscicola* + *T. viride*) в растениях отмечали снижение накопления МДА почти до контрольных значений. В меньшей степени данный эффект проявился в варианте № 4 с внесением *T. viride*, что, вероятно, обусловлено, относительно невысокой антагонистической активностью данного МО по отношению к *F. culmorum*. В большей степени снижает интенсивность ПОЛ у растений, обусловленную микромицетом, внесение в грунт *F. muscicola* (варианты № 3 и № 5). Цианобактерии синтезируют разнообразные циклические липопептиды, обладающие фунгицидной активностью, действуя через холестерин- и эргостерин-зависимое разрушение мембран [14]. Микромицеты рода *Trichoderma* способны влиять на фитопатоген, например, вырабатывая фунгициды – антрахиноны (пахибазин, хризофанол, эмодин, ω-гидроксипахибазин, 1,5- и 1,7-дигидрокси-3-гидроксиметил-9,10-антрахиноны), которые способствуют закручиванию гиф микромицета вокруг гриба и способствуют его уничтожению (патогенез) [15].

В ответ на действие стресс-фактора активируется работа защитной системы самого организма, что проявляется в синтезе антиоксидантов. Клетки содержат вещества, способные ингибировать процессы свободно радикального окисления макромолекул с образованием менее токсичных продуктов. К ним относят аскорбиновую кислоту, каротиноиды, α-токоферол, глутатион, пролин, сахара, соединения фенольной природы, полиамины и др. Дисбаланс между оксидантами и антиоксидантами в пользу оксидантов, потенциально приводящий к повреждению,

называется «оксидативным стрессом» [16]. Общее содержание антиоксидантов в листьях мелиссы при внесении в грунт суспензии мицелия *F. culmorum* (вариант № 2) было в 1,6 раза выше по сравнению с контролем. Использование МО-антагонистов значительно снижало данный показатель. В вариантах № 4 и № 5 АОА растений незначительно превышала контроль. При внесении в грунт *F. muscicola* (вариант № 3) значение общего содержания антиоксидантов было ниже контроля в 1,6 раза.

Активация процессов ПОЛ в растительных клетках приводила к накоплению ФС. В вариантах с внесением МО отмечали большее накопление ФС, чем в контроле (в 1,3–3,4 раза), что свидетельствует о более активной работе защитной системы растения в ответ на действие стресс-фактора. Максимальное содержание данных соединений определено в варианте № 2 с внесением суспензии мицелия фитопатогенного микромицета *F. culmorum*. В других вариантах отмечали более низкие значения данного показателя, что может быть обусловлено антагонистическим эффектом *F. muscicola* и *T. viride*.

Существует прямая корреляционная зависимость между содержанием ФС и МДА ($r = 0,69$), ФС и АОА ($r = 0,84$), МДА и АОА ($r = 0,69$), что указывает на активацию антиоксидантной системы растений (накопление антиоксидантов и ФС) в условиях окислительного стресса.

Несмотря на антагонистическую роль *F. muscicola* и *T. viride*, а также биосинтез антиоксидантов в клетках мелиссы, изредка встречаются, особенно в варианте с микромицетом без антагонистов, растения с признаками окислительного стресса на листьях (увядание и усыхание краёв листовых пластинок).

Таблица 3 / Table 3

Влияние микроорганизмов на содержание фенольных соединений (ФС), малонового диальдегида (МДА), антиоксидантной активности (АОА) в растениях мелиссы / The effect of microorganisms on the content of phenolic compounds, malondialdehyde, antioxidant activity in melissa plants

№ No.	Варианты опыта Variants of the experiment	С(МДА), мкмоль/г Malondialdehyde content, μmol/g	АОА, мг рутина/г Antioxidant activity, mg of rutin/g	ФС, мг галловой кислоты/г / The content of phenolic compounds, mg of gallic acid/g
1	Контроль / Control	4,02±0,32	46,4±1,2	50,90±0,26
2	<i>F. culmorum</i>	7,21±0,22**	75,0±0,7***	93,5±0,7***
3	<i>F. culmorum</i> + <i>F. muscicola</i>	4,6±1,0	29,30±0,30***	59,20±0,23***
4	<i>F. culmorum</i> + <i>T. viride</i>	5,35±0,26*	52,0±0,7*	64,9±1,4***
5	<i>F. culmorum</i> + <i>F. muscicola</i> + <i>T. viride</i>	4,30±0,29	60,0±0,4***	84,30±0,12***

Примечание: различия с контролем достоверны при * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.
Note: the differences with the control are significant at: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Выводы

Валидированы методики определения суммы антиоксидантов методом кулонометрического титрования на анализаторе «Эксперт-006» и фенольных соединений методом спектрофотометрии с реактивом Фолина-Чокальтеу в спиртовых экстрактах из Melissa лекарственной. Показано, что в целом методики валидны по показателям: линейность, повторяемость и правильность и могут быть использованы в исследовании содержания антиоксидантов и фенольных соединений в Melissa.

Присутствие в грунте для выращивания Melissa патогенного микромицета *F. culmorum* оказывает стрессовое действие на растения: интенсивность ПОЛ, содержание ФС и АОА в листьях были достоверно выше по сравнению с контролем.

Внесение в грунт микроорганизмов-антагонистов *F. muscicola* и *T. viride* позволяет ослабить воздействие фитопатогена. Изученные антагонисты могут быть рекомендованы как перспективные для разработки на их основе биопрепаратов с целью защиты лекарственных растений от фузариозов после подбора оптимальных технологических условий.

Таким образом, действие фитопатогена, с одной стороны, стимулирует выработку антиоксидантов в растениях Melissa; с другой стороны – приводит к напряжённой работе антиоксидантной системы и нарушению нормального функционирования растения. Кроме того, возможно накопление фитотоксинов в самом лекарственном сырье, что требует специальной проверки.

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

References

1. Grebennikova O.A., Paliy A.E., Logvinenko L.A. Biologically active substances of lemon balm // Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. Series: Biology, Chemistry. 2013. V. 26 (65). No. 1. P. 43–50 (in Russian).
2. Golovko T.K., Silina E.V., Lamshanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

3. State Pharmacopoeia of the Russian Federation. Edition XIV. OFS 1.1.2012.15 Validation of analytical methods. Moskva, 2018. P. 276–278 (in Russian).

4. Validation of analytical methods (Guidelines for Laboratories). Sankt-Peterburg: Professiya, 2016. 312 p. (in Russian).

5. Denisenko T.A., Vishnikov A.B., Tsyganok L.P. Spectrophotometric determination of the amount of phenolic compounds in plant objects using aluminum chloride, 18-molybdodiphosphate and the Folin-Ciocalteu reagent // Analytical and Control. 2015. No. 4. P. 373–380 (in Russian).

6. Bubenchikova V.N., Starchak Yu.A. Validation of the method for the quantitative determination of the amount of flavonoids in thyme herb // Belgorod State University Scientific Bulletin. Medicine. Pharmacy. 2012. No. 12. P. 157–160 (in Russian).

7. Kuzmenko A.N., Nesterova O.V., Suleymanova F.Sh., Matyushin A.A., Krasnyuk I.I. Modification of the method for the quantitative determination of flavonoids in the herb of Canadian goldenrod // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Khimiya. 2019. V. 60. No. 1. P. 49–54 (in Russian).

8. Kutateladze G.R., Fedoseeva L.M. Research on the development and validation of a method for the quantitative determination of flavonoids in sorrel grass harvested in the Altai territory // Drug Development & Registration. 2019. No. 2. P. 80–86 (in Russian).

9. Konovalov D.A., Konovalova D.S. Development of a method for the quantitative determination of flavonoids in the herb feverfew and its validation // Belgorod State University Scientific Bulletin. Medicine. Pharmacy. 2012. No. 16. P. 156–159 (in Russian).

10. Evdokimova O.V. Development and validation of a method for the quantitative determination of the amount of flavanoids in yarrow herb // Proceedings of Voronezh State University. Series “Chemistry. Biology. Pharmacy. 2007. No. 2. P. 155–160 (in Russian).

11. Ivanova A.V. Potentiometry in the study of antioxidant and antiradical properties of substances: Diss. ... dr. chem. sciences. Yekaterinburg, 2019. 350 p. (in Russian).

12. Total antioxidant and oxidant activity: making measurements on a coulometric analyzer. Moskva: Econiks-Expert LLC, 2010. 18 p. (in Russian).

13. Lukatkin A.S. Cold damage to thermophilic plants and oxidative stress. Saransk: Izdatelstvo Mordovskogo universiteta, 2002. 208 p. (in Russian).

14. Osman R.K., Goda H.A., Higazy A.M. Evaluation of some extra- and intracellular cyanobacterial extracts as antimicrobial agents // International Journal of Advanced Research. 2015. V. 3. No. 5. P. 852–864.

15. Gessler N.N., Egorova A.S., Belozerskaya T.A. Fungal anthraquinones // Applied Biochemistry and Microbiology. 2013. V. 49. No. 2. P. 85–99. doi: 10.1134/S000368381302004X

16. Sies H. Oxidative stress: oxidants and antioxidants // Experimental Physiology. 1997. V. 82. No. 2. P. 291–295. doi: 10.1113/expphysiol.1997.sp004024

Влияние фитопатогенов на содержание пластидных пигментов и интенсивность процессов перекисного окисления липидов в листьях древесных растений

© 2022. С. Ю. Огородникова¹, к. б. н., с. н. с.,
С. В. Пестов^{1,2}, к. б. н., доцент, В. В. Зиновьев², аспирант,
А. П. Софронов³, к. с.-х. н., зав. лабораторией,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

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

²Вятский государственный университет,

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

³Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого,

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

e-mail: svetao_05@mail.ru

Представлены сведения о повреждаемости листьев патогенными организмами и влиянии фитопатогенов на содержание пластидных пигментов и интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в листьях древесных растений. Исследования проводили в г. Кирове и его окрестностях (подзона южной тайги Европейского Северо-Востока). В период исследования на 17 видах древесных растений были обнаружены повреждения, вызванные фитопатогенами. Наиболее распространёнными группами инфекционных заболеваний являлись пятнистости, реже встречались ржавчины и мучнистая роса. Вирусные инфекции (мозаики) вносили незначительный вклад в общее число инфекционных заболеваний древесных растений. Болезни грибной и вирусной природы вызывали сходные неспецифические ответные реакции в листьях древесных растений, которые проявлялись в снижении уровня фотосинтетических пигментов. В повреждённых листьях содержание хлорофиллов и каротиноидов было меньше, чем в здоровых, соотношение пигментов в большинстве случаев не изменялось. Повышенное, по сравнению со здоровыми листьями, накопление малонового диальдегида в инфицированных клетках растений свидетельствует о прогрессирующем разрушении мембран. Изменение окраски листьев, поражённых фитопатогенами, может быть следствием окислительной дегградации молекул пигментов под действием активных радикалов, образующихся в процессе ПОЛ. Различия в реакции на действие фитопатогенов определяются физиолого-биохимическими и морфологическими особенностями разных видов древесных растений.

Ключевые слова: древесные растения, фитопатогены, пятнистости, ржавчина, мучнистая роса, мозаика, хлорофиллы, каротиноиды, перекисное окисление липидов.

Influence of phytopathogens on the content of plastid pigments and the intensity of lipid peroxidation processes in the leaves of woody plants

© 2022. S. Yu. Ogorodnikova¹ ORCID: 0000-0001-8865-4743^{*}
S. V. Pestov^{1,2} ORCID: 0000-0002-5464-793X^{*}

V. V. Zinoviev² ORCID: 0000-0002-5621-2120^{*} A. P. Sofronov³ ORCID: 0000-0002-9507-8622^{*}

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

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

²Vyatka State University,

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

³N. V. Rudnitsky Federal Agricultural Science Center of the North-East,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

e-mail: svetao_05@mail.ru

Data on leaf damage by pathogenic organisms and the effect of phytopathogens on the content of plastid pigments and the intensity of lipid peroxidation (LPO) processes in the leaves of woody plants are presented. The studies were carried out in the city of Kirov and its environs (southern taiga subzone). The assessment of damage to the leaves of woody plants by pathogens was carried out in different parts of the city in parks and on the territory of the experimental garden of the Federal Agricultural Research Center of the North-East. To determine the degree of damage to woody plants, 100 leaves were collected from each plot (10 leaves from 10 trees or shrubs). Leaves were sampled in the first half of the day to determine photosynthetic pigments and the intensity of LPO processes. The content of chlorophylls and carotenoids was determined in acetone extract. The intensity of lipid peroxidation processes was assessed by the accumulation of malonic dialdehyde (MDA). During the study period, damage caused by phytopathogens was found on 17 species of woody plants, the most common groups of infectious diseases are spotting, rust and powdery mildew are less common. Virus infections (mosaics) make an insignificant contribution to the total number of infectious diseases of woody plants. Diseases caused by fungi and viruses induced similar non-specific responses in the leaves of woody plants, which manifested themselves in a decrease in the level of photosynthetic pigments. In infected leaves, the content of chlorophylls and carotenoids was lower than in healthy leaves, the ratio of pigments in most cases did not change. An increased accumulation of MDA in infected plant cells indicates a progressive destruction of membranes. A change in the color of leaves affected by phytopathogens may be a result of the oxidative degradation of pigment molecules under the action of active radicals formed during LPO. Differences in the intensity of biochemical changes in leaves in response to the action of phytopathogens are determined by the physiological, biochemical and morphological characteristics of different types of woody plants.

Keywords: woody plants, phytopathogens, spotting, rust, powdery mildew, mosaic, chlorophylls, carotenoids, lipid peroxidation.

В процессе индивидуального развития древесные растения подвергаются воздействию комплекса неблагоприятных факторов разной природы. Среди биотических стрессоров особое место занимают патогенные организмы, которые являются возбудителями инфекционных болезней деревьев и кустарников. Грибы вызывают 97% инфекционных болезней лесных древесных пород, бактерии – 2%, вирусы – 1% [1].

Развитие патологического процесса при инфекционных болезнях растений происходит в несколько этапов: заражение, инкубационный период, болезнь и выздоровление или отмирание поражённых частей либо всего растения [2]. На этапе заболевания проявляются внешние признаки инфекционного процесса (изменение окраски, появление пятен, наростов, деформация листьев и побегов и др.), которые являются результатом физиолого-биохимических и морфологических изменений в растительных клетках, вызванных болезнетворными микроорганизмами.

Растения реагируют на попытку инфицирования широким спектром защитных реакций, которые определяют активный врождённый иммунитет растений [2]. В ответ на поражение патогеном в клетках растений накапливаются вещества, оказывающие протекторное действие (серосодержащие белки, РР-белки, антивирусные белки, гликопротеиды, ингибиторы протеиназ); синтезируются низкомолекулярные антимикробные вещества (фитоалексины); подавляется образование жизненно важных для инфицирующих агентов веществ (полиамины при поражении ржавчиной); из гликозидов образуются высо-

ко токсичные вещества (агликоны), убивающие растительную клетку и находящиеся в ней паразитов [3].

В случае инфицирования растений патогеном в клетках происходит образование активных форм кислорода (АФК) [4, 5]. Растения активно продуцируют АФК в качестве сигнальных молекул для контроля таких процессов, как запрограммированная гибель клеток и защита от патогенов [6].

Повышенное накопление АФК приводит к активации окислительных процессов, приводящих к повреждениям белков, нуклеиновых кислот, липидов, ферментов и клеточных структур [7]. Атака на полиненасыщенные жирные кислоты в мембранах инициирует перекисное окисление липидов (ПОЛ), приводящее к разрушению мембран и к изменениям мембраносвязанных ферментных систем. Мучнистая роса индуцирует активацию процессов ПОЛ в листьях *Hevea brasiliensis* [8]. Радикалы, образующиеся в процессе ПОЛ, вызывают обесцвечивание пигментов [9].

Антиоксидантная система, которая включает ферменты и низкомолекулярные антиоксиданты, снижает уровень АФК в растительной клетке [10]. Во время инфицирования или после образования поражения отмечается повышение активности антиоксидантных ферментов вокруг очагов инфекции, что направлено на защиту клеток, прилегающих к очагам поражения, от повреждения, вызванного радикалами [11].

Заражение листьев тополя ржавчиной вызывает окислительный стресс и повреждение клеточных мембран, а также изменяет активность антиоксидантных ферментов (каталаза,

супероксиддисмутаза, пероксидаза, полифенолоксидаза) и изоферментный профиль [12]. В заражённых вирусами растениях *Cucumis sativus* и *Cucurbita pepo* происходит индукция супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаз и аскорбатпероксидаз. Все изоформы пероксидазы, обнаруженные в клетках огурца и цуккини, не только функционировали как поглотители радикалов, но и катализировали образование пероксида водорода [13].

Первичной защитной реакцией некоторых растений на заражение фитопатогенами является реакция сверхчувствительности, которая проявляется в быстрой локальной гибели растительных клеток в очаге инфекции. В клетке прекращает функционировать система антиоксидантной защиты, образуется большое количество АФК и свободных радикалов [5, 14], происходит модификация клеточной стенки, накопление фитоалексинов, фенольных соединений [3]. В результате биохимических преобразований клетка погибает, вместе с ней гибнет и патоген. Некрозы на листьях растений, поражённых болезнетворными микроорганизмами, образуются в результате необратимой дегградации клеточных структур и останавливают перемещение паразита.

Достаточно хорошо изучены ответные биохимические реакции культурных травянистых растений на действие патогенных организмов [11, 15, 16], данные о биохимическом отклике древесных растений на возбудителей инфекционных болезней разрознены [8, 12, 17].

Целью данной работы было изучение интенсивности процессов перекисного окисления липидов и содержания пластидных пигментов в листьях древесных растений, повреждённых патогенными организмами.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в г. Кирове и его окрестностях (подзона южной тайги Европейского Северо-Востока). Оценивали повреждаемость листьев древесных растений в разных частях города в парковых насаждениях (парк имени Ю. А. Гагарина, парк Аполло, сквер 50-летия СССР, Александровский сад, парк имени С.М. Кирова, парк Победы, дендрологический парк лесоводов Кировской области) и на территории экспериментального сада ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока.

Объектами исследования были 17 видов древесных растений. Сбор материала проводили по второй декаде июля. Листья отбирали с деревьев и кустарников, находящихся в оди-

наковых экологических условиях (уровень увлажнения, освещённости и т. д.). Изучали древесные растения в генеративном возрастном состоянии с чётко выраженными видовыми признаками. Листья деревьев отбирали из нижней части кроны, листья кустарников – из средней части кроны, отбор листьев проводили с разных сторон кроны. Для выявления степени повреждения древесных растений патогенами собирали 100 листьев (по 10 листьев с 10 деревьев или кустарников).

Для изучения биохимических параметров отбирали листья без повреждений (контроль) и повреждённые фитопатогенами. Пробы листьев для определения пластидных пигментов фиксировали кипящим уксусом. В уксусном экстракте фотометрически определяли содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов при длинах волн 662, 644 и 470 нм соответственно [18, 19]. Содержание пигментов в листьях выражали в мг/г сухой массы.

Интенсивность процессов ПОЛ в листьях оценивали по накоплению одного из продуктов – малонового диальдегида (МДА). Концентрацию МДА в экстракте определяли на спектрофотометре при длине волны 532 нм [20]. Содержание МДА в листьях выражали в нмоль/г сырой массы. Фотометрические измерения выполняли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ (Экротхим, Россия).

Статистическую обработку полученных данных выполняли в программе Past 2.17, построение графиков осуществляли в Excel 2002 for Windows.

Результаты и обсуждение

Инфекционные болезни листьев деревьев и кустарников часто встречаются в городских насаждениях, парках, садах и питомниках. Лиственные породы, кустарники, плодовые растения большей частью поражаются грибами, бактериальными и вирусными инфекциями встречаются очень редко.

В период исследования на листьях 17 видов древесных растений были обнаружены три типа повреждений, вызванных представителями различных видов фитопатогенных грибов: пятнистости, ржавчина и мучнистая роса. Пятнистости встречались на всех изученных видах (табл. 1). Максимальная степень поражения пятнистостями отмечена на боярышнике и тополе бальзамическом (более 80%). Ржавчины определены только на берёзе, осине, рябине и черёмухе. Наиболее распространёнными и обладающими высокой интенсивностью пора-

жения листьев характеризуются ржавчины рябины и осины. Мучнистая роса встречается на шести видах растений, максимальная интенсивность поражения отмечена на дубе и карагане.

Мучнистая роса – инфекционная болезнь растений, которую вызывают микроскопические эктопаразитические мучнисторосые грибы (порядок эризифовые) класс подсумчатых [2]. Все они – узкоспециализированные облигатные паразиты, которые образуют на поражённых органах (листьях, побегах) поверхностный мицелий. В наших исследованиях мучнистая роса была обнаружена на листьях шести видов растений. Наиболее сильно этой группой грибов повреждается карагана древоидная, клён ясенелистный и дуб черешчатый. Интенсивность поражения этих растений мучнистой росой превышает 30%. Клён платанолистный и осина слабо поражаются грибами, вызывающими мучнистую росу (менее 15%).

На территории сада ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока листья караганы древоидной были на 70% покрыты белым мучнистым налётом, который, очевидно, представляет собой мицелий и споры одного из возбудителей мучнистой росы *Microsphaera paczewiskii* [21]. Содержание фотосинтетических пигментов

в листьях караганы, инфицированных грибами, было значительно ниже, чем в здоровых (рис. 1). В одинаковой степени (на 30%) снижалось накопление хлорофиллов *a* и *b* в поражённых листьях. Каротиноиды были более устойчивы к заражению листьев караганы грибной инфекцией, количество жёлтых пигментов в повреждённых листьях было на 20% меньше по сравнению со здоровыми листьями. Интенсивность процессов ПОЛ в клетках не изменялась при заселении листьев караганы мучнистой росой, уровень МДА в здоровых и инфицированных листьях составлял 53 ± 2 и 48 ± 1 нмоль/г сырой массы соответственно.

Известно, что в листьях древесных растений, поражённых мучнистой росой, изменяется структура мембран хлоропластов, снижается содержание хлорофилла, подавляется флюоресценция хлорофилла [8, 22]. Показано, что на первых этапах инфицирования листьев пшеницы мучнистой росой отмечен рост накопления хлорофиллов, по мере развития заболевания содержание хлорофиллов снижается, в результате задержки и угнетения развития хлоропластов, на поздних стадиях происходит дегградация хлоропластов [23]. Инфицирование дуба (*Quercus robur* L.) возбудителем мучнистой росы *Discula umbrinella* оказывает

Таблица 1 / Table 1

Средняя интенсивность поражения листьев древесных растений фитопатогенами в г. Кирове, %
Average intensity of woody plant leaf damage by phytopathogens in the city of Kirov, %

Вид растения Plant species	Группы болезней / Type of damage		
	пятнистости spotting	ржавчины rust	мучнистая роса powdery mildew
Берёза повислая – <i>Betula pendula</i> Roth	4,3	3,3	26,3
Боярышник кроваво-красный – <i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	81,0	–	–
Вишня – <i>Prunus cerasus</i> L.	5,0	–	–
Вяз гладкий – <i>Ulmus laevis</i> Pall.	21,0	–	–
Дуб черешчатый – <i>Quercus robur</i> L.	10,0	–	67,0
Ирга круглолистная – <i>Amelanchier ovalis</i> Medik.	38,0	–	–
Карагана древоидная – <i>Caragana arborescens</i> Lam.	7,0	–	85,0
Клён ясенелистный – <i>Acer negundo</i> L.	5,0	–	38,3
Клён платанолистный – <i>Acer platanoides</i> L.	41,0	–	3,0
Липа – <i>Tilia cordata</i> Mill.	38,6	–	–
Осина – <i>Populus tremula</i> L.	39,0	54,0	7,0
Рябина – <i>Sorbus aucuparia</i> L.	46,8	26,5	–
Смородина чёрная – <i>Ribes nigrum</i> L.	12,0	–	–
Тополь бальзамический – <i>Populus balsamifera</i> L.	97,0	–	–
Черёмуха обыкновенная – <i>Prunus padus</i> L.	2,0	3,0	–
Черноплодная рябина – <i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott	5,0	–	–
Яблоня домашняя – <i>Malus domestica</i> Borkh.	15,0	–	–

Примечание / Note: «–» – не обнаружено / not detected.

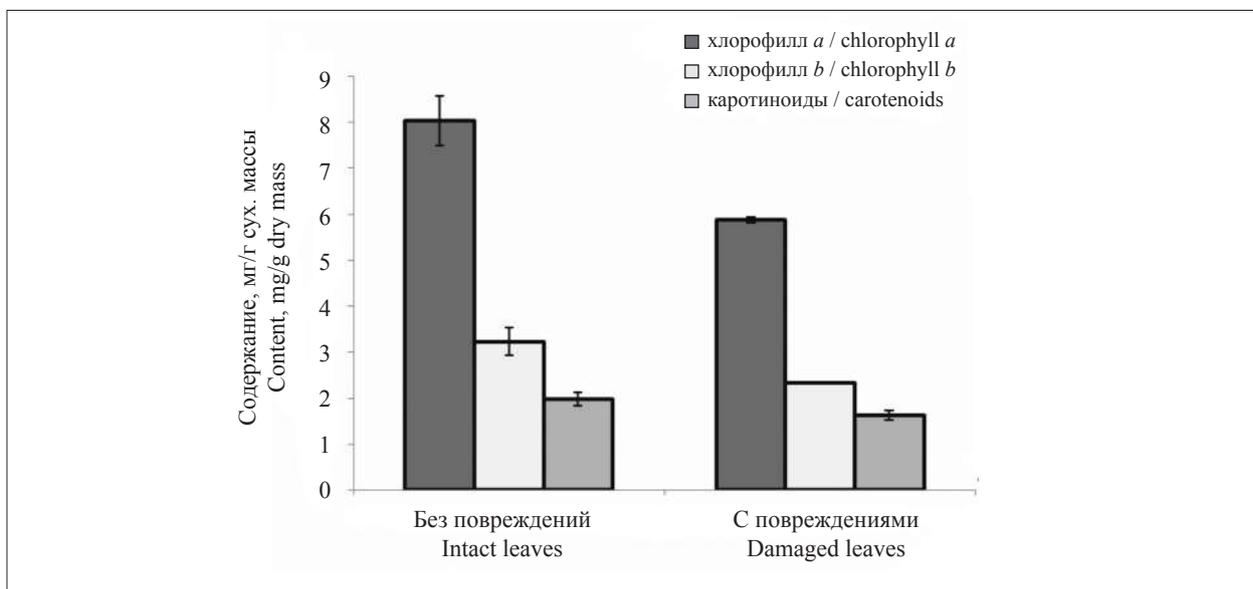


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Caragana arborescens*, повреждённых мучнистой росой
Fig. 1. The content of photosynthetic pigments in the leaves of *Caragana arborescens* damaged by powdery mildew

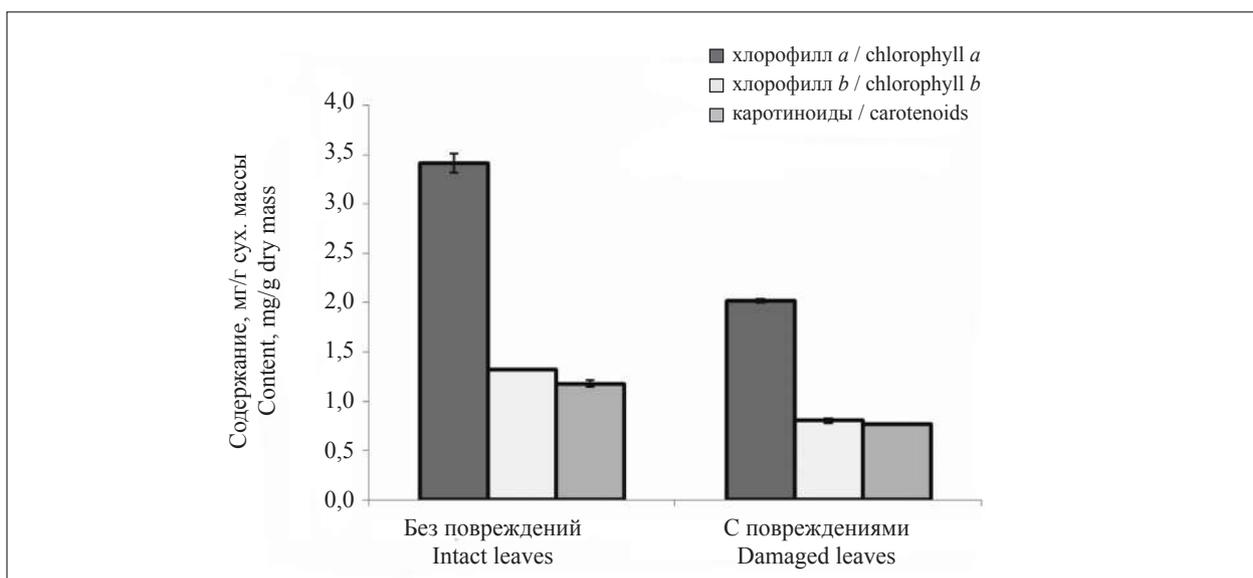


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Malus domestica*, повреждённых пятнистостью
Fig. 2. The content of photosynthetic pigments in the leaves of *Malus domestica* damaged by spotting

влияние на процессы биосинтеза изопрена, который является субстратом для синтеза каротиноидов и фитольной цепи хлорофиллов [24]. По-видимому, изменения в пигментном комплексе листьев караганы, поражённых мучнистой росой, обусловлены повреждением структуры хлоропластов и нарушением процессов биосинтеза пигментов.

Пятнистости вызываются чаще всего зуаскомицетами и несовершенными грибами. Они характеризуются образованием на

листьях плоских (некротических) или выпуклых (строматических) пятен различной окраски, формы и размера [2]. Плоские пятна представляют собой отмершие участки тканей, на которых образуются спороношения возбудителей. В г. Кирове пятнистости встречались на всех изученных видах древесных растений. Наибольшая степень поражения пятнистостями отмечена на липе, рябине, боярышнике и тополе бальзамическом (более 80%). Вяз гладкий, клён платанолистный

и ирга круглолистная характеризуются средней (30–40%) повреждаемостью пятнистостями. Поражаемость остальных растений – менее 15%.

Под влиянием грибной инфекции на листьях яблони происходит образование бурых пятен, которые занимают 5–10% площади листа. В поражённых грибной инфекцией листьях яблони уровень пластидных пигментов был ниже на 40% по сравнению со здоровыми листьями (рис. 2). В одинаковой степени уменьшалось содержание хлорофиллов и каротиноидов под влиянием патогенов, соотношение пигментов не изменялось.

Грибная инфекция не оказывала влияния на интенсивность процессов ПОЛ в листьях яблони, уровень МДА в здоровых листьях и листьях с пятнистостью составлял соответственно 102 ± 8 и 97 ± 7 нмоль/г сырой массы.

Патогенные грибы рода *Phyllosticta* sp. вызывают образование пятен на листьях вяза гладкого [21]. В повреждённых листьях выявлена тенденция снижения уровня фотосинтетических пигментов, соотношение пигментов не изменялось (табл. 2). Отмечали значительное, в 2 раза, возрастание интенсивности процессов ПОЛ, что свидетельствует о высокой активности окислительных процессов в листьях, поражённых грибной инфекцией.

Ржавчина вызывается ржавчинными грибами (порядок Uredinales, класс телиомитцы). Все ржавчинные грибы – облигатные паразиты с узкой специализацией. Диагностическими признаками ржавчины являются споронии, образующиеся на разных стадиях развития возбудителей [2]. На территории г. Кирова ржавчинами поражаются

листья пяти из семнадцати изученных нами видов растений. Наиболее интенсивно (более 50%) повреждаются листья осины и рябины. Слабое заражение ржавчиной характерно для берёзы, клёна ясенелистного и черёмухи.

Ржавчина на рябине проявляется на верхней стороне листьев в виде пятен различной формы, диаметром 2–5 мм, оранжево-жёлтого цвета, с тёмно-коричневыми бугорками на поверхности. Возбудитель ржавчины на листьях рябины – гриб *Gymnosporangium cornutum* [21].

Повреждение листьев рябины ржавчинными грибами вызывает снижение уровня пластидных пигментов (рис. 3). В листьях, поражённых ржавчиной, содержание хлорофиллов и каротиноидов было на 15–18% меньше по сравнению со здоровыми листьями. Снижение накопления фотосинтетических пигментов в листьях коррелирует с активацией окислительных процессов в листьях с повреждениями. Ржавчинные грибы индуцировали активацию процессов ПОЛ в листьях рябины, уровень МДА составлял 162 ± 8 нмоль/г сырой массы, против 138 ± 3 нмоль/г сырой массы в неповреждённых листьях.

Наши данные согласуются с результатами других исследователей. Так в листьях тополя, инфицированных ржавчинными грибами, отмечали активацию ферментов антиоксидантной защиты, накопление продуктов ПОЛ и снижение накопления хлорофиллов и каротиноидов [12].

Грибные инфекции, вызывающие повреждения растений (мучнистая роса, пятнистости, ржавчины), приводят к снижению накопления фотосинтетических пигментов в листьях, причём в равной степени уменьшается содержание хлорофиллов и каротиноидов.

Таблица 2 / Table 2
Содержание пластидных пигментов и малонового диальдегида в листьях *Ulmus laevis*, поражённых пятнистостью / The content of plastid pigments and malonic dialdehyde in leaves of *Ulmus laevis* damaged by spotting

Вариант Variant	Содержание, мг/г сухой массы Content, mg/g dry mass			Содержание малонового диальдегида, нмоль/г сырой массы / The content of malonic dialdehyde, nmol/g wet mass
	хлорофилл / chlorophyll		каротиноиды carotenoids	
	a	b		
Листья без повреждений Intact leaves	$7,54 \pm 0,09$	$3,37 \pm 0,09$	$2,21 \pm 0,01$	95 ± 4
Листья повреждённые Damaged leaves	$7,1 \pm 0,5$	$3,17 \pm 0,32$	$2,02 \pm 0,15$	$197 \pm 9^*$

Примечание: * – различия достоверны при $p \leq 0,05$.
Note: * – differences are significant at $p \leq 0,05$.

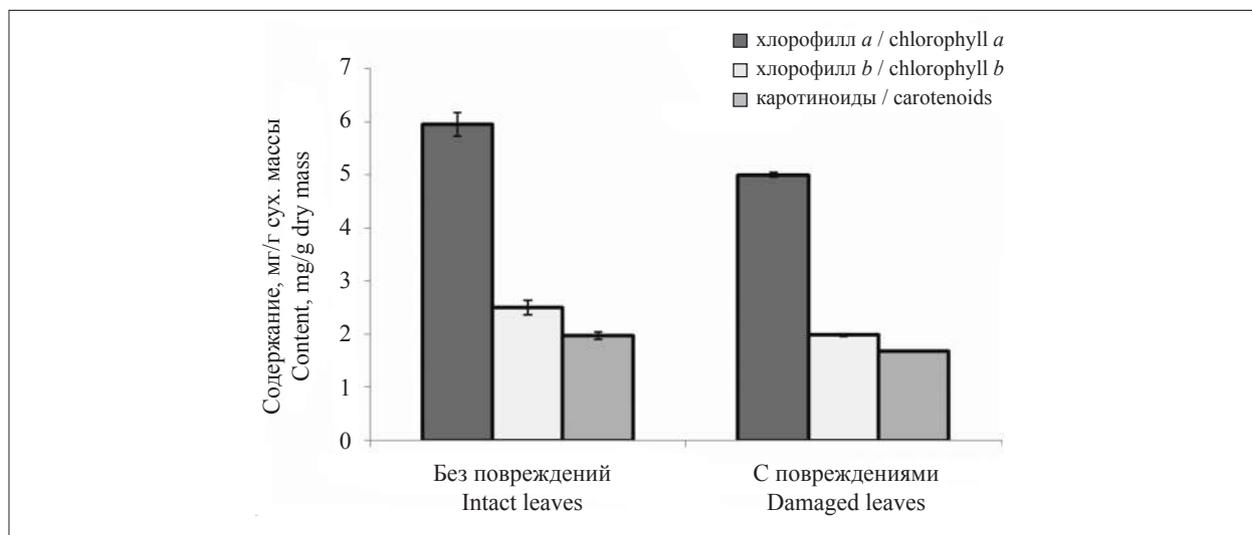


Рис. 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Sorbus aucuparia*, поражённых ржавчиной
Fig. 3. The content of photosynthetic pigments in the leaves of *Sorbus aucuparia* affected by rust

Таблица 3 / Table 3

Содержание пластидных пигментов и малонового диальдегида в листьях *Sorbus aucuparia* и *Populus laurifolia*, повреждённых мозаикой
 The content of plastid pigments and malonic dialdehyde in leaves of *Sorbus aucuparia* и *Populus laurifolia* infected with mosaic

Вариант Variant	Содержание, мг/г сухой массы Content, mg/g dry mass			Содержание малонового диальдегида, нмоль/г сырой массы / The content of malonic dialdehyde, nmol/g wet mass
	хлорофилл / chlorophyll		каротиноиды carotenoids	
	a	b		
<i>Sorbus aucuparia</i>				
Листья без повреждений Intact leaves	5,96±0,22	2,51±0,13	1,98±0,07	137,99±2,94
Листья повреждённые Damaged leaves	3,78±0,31*	1,47±0,13*	1,30±0,10*	183,42±14,34*
<i>Populus laurifolia</i>				
Листья без повреждений Intact leaves	4,26±0,49	3,40±0,41	1,68±0,18	43,94±3,92
Листья повреждённые Damaged leaves	4,03±0,34	1,63±0,12*	1,15±0,10	65,02±7,81*

Примечание: * – различия достоверны при $p \leq 0,05$.
 Note: * – differences are significant at $p \leq 0.05$.

Степень изменений в пигментном фонде зависит от индивидуальных особенностей вида (анатомо-морфологических и физиолого-биохимических характеристик). Интенсивность процессов ПОЛ в листьях, поражённых грибной инфекцией, изменяется значимо только у вяза гладкого (в 2 раза), в остальных случаях уровень МДА был близок к таковому в листьях без повреждений.

Вирусные инфекции вносят незначительный вклад в общее число инфекционных заболеваний древесных растений. К вирусным болезням растений относят мозаики. Эти заболевания характеризуются пёстрой, мозаичной окраской, при которой тёмно-зелёные участки листа чередуются со светло-зелёными или жёлтыми. Некротические участки могут иметь вид полос, пятен, колец. Нередко мозаика

сопровождается деформацией листовых пластинок, которые становятся морщинистыми, курчавыми, нитчатыми [1, 2].

Поражение листьев рябины вирусом мозаики приводило к снижению накопления пластидных пигментов (табл. 3). Количество хлорофиллов и каротиноидов в инфицированных листьях было на 35–40% меньше, чем в здоровых. Соотношение пигментов не изменялось, что свидетельствует об одинаковой чувствительности хлорофиллов и каротиноидов к действию патогена. В клетках листьев, повреждённых вирусом, отмечена повышенная активность процессов ПОЛ. Возможно, одной из причин пожелтения участков листьев рябины, поражённых мозаикой, является снижение количества пластидных пигментов в результате окислительной дегградации молекул пигментов.

В листьях тополя лавролистного отмечен сходный характер биохимических изменений в ответ на поражение вирусом. Интенсивность процессов ПОЛ, которую оценивали по накоплению МДА, была выше в повреждённых листьях по сравнению с неповреждёнными. Отмечена повышенная устойчивость хлорофилла *a* к поражению вирусной инфекцией. Хлорофилл *b* и каротиноиды отличались большей чувствительностью к возбудителям болезни, уровень пигментов в повреждённых листьях составлял 50 и 70% по сравнению со здоровыми.

Снижение уровня пластидных пигментов в листьях, поражённых мозаикой, является неспецифической реакцией на действие вирусов, которая хорошо изучена на травянистых растениях. Изменения в пигментном комплексе проявляются не сразу после поражения вирусом. Через 2 недели после инфицирования отмечено снижение уровня хлорофиллов в листьях табака [25], горчицы стеблевой [26] и гороха [27]. Среди причин уменьшения количества фотосинтетических пигментов в листьях растений может быть активация окислительных процессов в поражённых клетках.

Наши данные по накоплению МДА в листьях, поражённых вирусной инфекцией, соотносятся с результатами других авторов. Показано, что в растениях, инфицированных вирусом мозаики огурца и вирусом жёлтой мозаики цуккини, происходит усиленное перекисное окисление полиненасыщенных жирных кислот, что указывает на ускоренный распад мембран. Радикальные интермедиаты, которые образуются во время ПОЛ, совместно окисляют молекулы пигмента, что может объяснить симптомы пожелтения, вызванные вирусом [16].

Заключение

Поражение фитопатогенами листьев древесных растений широко распространено в городских садово-парковых насаждениях. Наиболее распространёнными группами инфекционных заболеваний являются пятнистости, реже встречаются ржавчины и мучнистая роса.

В ходе работы было определено влияние поражения фитопатогенами (грибные и вирусные инфекции) древесных растений и кустарников на содержание в их листьях фотосинтетических пигментов и интенсивность процессов ПОЛ. Изучение биохимического статуса листьев проводили на последнем этапе развития инфекционного заболевания, когда визуально можно было выявить поражение растений патогенными микроорганизмами. Поэтому полученные данные по уровню пластидных пигментов и МДА можно рассматривать как результат адаптационных биохимических изменений, которые индуцировали фитопатогены в клетках. Болезни грибной и вирусной природы вызывали сходные неспецифические ответные реакции в листьях древесных растений, которые проявлялись в снижении уровня фотосинтетических пигментов. Изменения в пигментном комплексе являются результатом биохимических перестроек в клетке. Повышенное накопление МДА в клетках повреждённых листьев свидетельствует о прогрессирующем разрушении мембран. Изменение окраски листьев, поражённых фитопатогенами, может быть следствием окислительной дегградации молекул пигментов под действием активных радикалов, образующихся в процессе ПОЛ. Различия в интенсивности биохимических изменений в листьях на действие фитопатогенов, по-видимому, определяются физиолого-биохимическими и морфологическими особенностями разных видов древесных растений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги».

References

1. Churakov B.P., Churakov D.B. Plant pathology. Moskva: GOU VPO MGUL, 2007. 424 p. (in Russian).
2. Sokolova E.S., Semenkova I.G. Forest phytopathology. Moskva: Lesnaya promyshlennost, 1981. 312 p. (in Russian).

3. Fundamental phytopathology / Ed. Yu.T. Dyakov. Moskva: Krasand, 2012. 512 p. (in Russian).
4. Elstner E.F., Osswald W. Mechanisms of oxygen activation during plant stress // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences. 1994. V. 102. P. 131–154.
5. Bolwell G.P., Wojtaszek P. Mechanisms for the generation of reactive oxygen species in plant defence – a broad perspective // Physiological and Molecular Plant Pathology. 1997. V. 51. No. 6. P. 347–366. doi: 10.1006/pmpp.1997.0129
6. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // Trends in Plant Science. 2002. V. 7. No. 9. P. 405–410. doi: 10.1016/s1360-1385(02)02312-9
7. Apel K., Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction // Annual Review of Plant Biology. 2004. V. 55. P. 373–399. doi: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701
8. Wang L., Wang M., Zhang Yu. Effects of powdery mildew infection on chloroplast and mitochondrial functions in rubber tree // Tropical Plant Pathology. 2014. V. 39. P. 242–250. doi: 10.1590/S1982-56762014000300008
9. Rice-Evans C.A., Diplock A.T., Symons M.C.R. Investigations of the consequences of free radical attack on lipids // Techniques in Free Radical Research / Eds. R.H. Burdon, P.H. Knippenberg. Amsterdam: Elsevier, 1991. P. 125–183.
10. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review // Annals of Botany. 2003. V. 91. Spec. No. 2. P. 179–194. doi: 10.1093/aob/mcf118
11. Fodor J., Gullner G., Adam A.L., Barna B., Kármives T., Kiraly Z. Local and systemic responses of antioxidants to tobacco mosaic virus infection and to salicylic acid in tobacco // Plant Physiology. 1997. V. 114. No. 4. P. 1443–1451. doi: 10.1104/pp.114.4.1443
12. Zhang S., Lu S., Xu X., Korpelainen H., Li C. Changes in antioxidant enzyme activities and isozyme profiles in leaves of male and female *Populus cathayana* infected with *Melampsora larici-populina* // Tree Physiol. 2010. V. 30. No. 1. P. 116–128. doi: 10.1093/treephys/tpp094
13. Riedle-Bauer M. Role of reactive oxygen species and antioxidant enzymes in systemic virus infections of plants // Journal of Phytopathology. 2000. V. 148. No. 5. P. 297–302. doi: 10.1046/j.1439-0434.2000.00503.x
14. Mehdy M.C. Active oxygen species in plant defense against pathogens // Plant Physiology. 1994. V. 105. No. 2. P. 467–472. doi: 10.1104/pp.105.2.467
15. Malamy J., Carr J.P., Klessig D.F., Raskin I. Salicylic acid: a likely endogenous signal in the resistance response of tobacco to viral infection // Science. 1990. V. 250. No. 4983. P. 1002–1004. doi: 10.1126/science.250.4983.1002
16. Lohaus G., Heldt H.W., Osmond C.B. Infection with phloem limited *Abutilon* mosaic virus causes localized carbohydrate accumulation in leaves of *Abutilon striatum*: relationships to symptom development and effects on chlorophyll fluorescence quenching during photosynthetic induction // Plant Biology. 2000. V. 2. No. 2. P. 161–167. doi: 10.1055/s-2000-9461
17. Melo G.A., Shimizu M.M., Mazzafera P. Polyphenoloxidase activity in coffee leaves and its role in resistance against the coffee leaf miner and coffee leaf rust // Phytochemistry. 2006. V. 67. P. 277–285. doi: 10.1016/J.PHYTOCHEM.2005.11.003
18. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382.
19. Maslova T.G., Popova I.A., Popova O.F. Critical evaluation of the spectrophotometric method for the quantitative determination of carotenoids // Fiziologiya rasteniy. 1986. V. 39. No. 6. P. 615–619 (in Russian).
20. Lukatkin A.S., Golovanova V.S. The intensity of lipid peroxidation in chilled leaves of heat-loving plants // Fiziologiya rasteniy. 1988. V. 35. No. 4. P. 773–780 (in Russian).
21. Sokolova E.S., Galasyeva T.G. Infectious diseases of leaves of woody plants. Moskva: MGUL, 2005. 42 p. (in Russian).
22. Percival G.C., Fraser G.A. The influence of powdery mildew infection on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, leaf chlorophyll and carotenoid content of three woody plant species // Arboricultural Journal. 2002. V. 26. No. 4. P. 333–346. doi: 10.1080/03071375.2002.9747348
23. Zitko S.E., Statler G.D., Nutter Jr.F.W. Chlorophyll of wheat leaves with differences in leaf rust severity and reaction type // Canadian Journal of Plant Pathology. 1985. V. 7. No. 2. P. 146–150. doi: 10.1080/0706066850950149
24. Bruggemann N., Schnitzler J.-P. Influence of powdery mildew (*Microsphaera alphitoides*) on isoprene biosynthesis and emission of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) leaves // Journal of Applied Botany and Food Quality. 2001. V. 75. P. 91–96.
25. Chaerle L., Pineda M., Romero-Aranda R., Van Der Straeten D., Baryn M. Robotized thermal and chlorophyll fluorescence imaging of pepper mild mottle virus infection in *Nicotiana benthamiana* // Plant and Cell Physiology. 2006. V. 47. No. 9. P. 1323–1336. doi: 10.1093/pcp/pcj102
26. Guo Y.-P., Guo D.-P., Peng Y., Chen J.-S. Photosynthetic responses of radish (*Paphanus sativus* var. *longipinnatus*) plants to infection by turnip mosaic virus // Photosynthetica. 2005. V. 43. P. 457–462. doi: 10.1007/s11099-005-0073-3
27. Perez-Bueno M.L., Rahoutei J., Sajjani C., Garcia-Luque I., Baron M. Proteomic analysis of the oxygen-evolving complex of photosystem II under biotic stress: Studies on *Nicotiana benthamiana* infected with tobamoviruses // Proteomics. 2004. V. 4. No. 2. P. 418–425. doi: 10.1002/pmic.200300655

Формирование модели управления экологизированным производством

© 2022. А. А. Малышев¹, к. э. н., доцент,

Н. Н. Солодков², к. г. н., доцент, Н. А. Коробкова², к. э. н., доцент,

¹Пензенский государственный технологический университет,

440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11,

²Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28,

e-mail: malyshe-aleksej@yandex.ru, niconsol@yandex.ru, sonata84@mail.ru

В статье рассматривается проблема управления экологизированным производством (ЭП) на различных уровнях: федеральном, региональном и уровне предприятия. Проанализированы подходы зарубежных и российских авторов к раскрытию сущности понятий «экологизированное производство», а также «зелёное производство», различных методов исследования данной проблемы. Приведена схема управления ЭП, а также результаты исследования структуры управления на различных уровнях. Проанализирована структура управления ЭП, осуществляемого федеральными и региональными органами исполнительной власти в соответствии с Законом «Об охране окружающей среды», что позволило систематизировать задачи и функции органов управления ЭП на федеральном, региональном и местном уровнях. Рассмотрены основные функции и принципы управления системой ЭП. Проведён анализ выбросов в атмосферу загрязняющих веществ в динамике по годам, проанализированы инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды (ОС) и рациональное использование природных ресурсов. Выявлена корреляция между всеми уровнями управления по динамике выбросов загрязняющих веществ и инвестициями в основной капитал. Предложена модель управления ЭП на трёх уровнях (федеральном, региональном и уровне предприятия), включающая функции, принципы, методы и инструменты. Модель ЭП базируется на следующих функциях: стимулирование, связанное с созданием мотивации предприятий по проведению экологической деятельности; перераспределение экологической деятельности, продукции и загрязнения между предприятиями-производителями; регулирование экологической деятельности, продукции и загрязнения предприятий и организаций; контролирующая функция, связанная с действиями контроля экологической деятельности, продукции и загрязнения; аккумулирующая функция, которая заключается в создании необходимого финансового и экологического резерва. Данная модель может быть использована экологическими службами различных предприятий, Министерством природных ресурсов и экологии при разработке стратегии развития, Управлением экономики, инновационной и научно-технической политики для разработки инновационных концепций экологической политики в регионах Российской Федерации.

Ключевые слова: зелёное производство, экологизация производства, управление в области экологического менеджмента, управление экологически чистым производством, система управления.

Formation of a green production management model

© 2022. A. A. Malyshev¹ ORCID: 0000-0002-1956-6712²

N. N. Solodkov² ORCID: 0000-0003-4357-1973²

N. A. Korobkova² ORCID: 0000-0003-2682-1504²

¹Penza State Technological University,

1a/11, Baydukova Passage/Gagarina St., Penza, Russia, 440039,

²Penza State University of Architecture and Construction,

28, Hermana Titova St., Penza, Russia, 440028,

e-mail: malyshe-aleksej@yandex.ru, niconsol@yandex.ru, sonata84@mail.ru

The article deals with the problem of managing green production at various levels: federal, regional and enterprise level. The approaches of foreign and Russian authors to the disclosure of the essence of the concepts of “ecologized production”, as well as “green production”, various methods of studying this problem are analyzed. A management scheme for green production is presented, as well as the results of a study of the management structure at various levels. The structure of green production management carried out by federal and regional executive authorities in accordance with

the Law "On Environmental Protection" was analyzed, which made it possible to systematize the tasks and functions of green production management bodies at the federal, regional and local levels. The main functions and principles of managing the system of green production are considered. An analysis of emissions of pollutants into the atmosphere in dynamics by years is given, investments in fixed assets aimed at protecting the environment and rational use of natural resources are analyzed. A correlation was found between all levels of management in terms of the dynamics of pollutant emissions and investments in fixed assets. A study has been conducted, which indicates that, firstly, the insufficiently efficient use of funds allocated for environmental protection; secondly, about the imperfection of the mechanisms for managing green production at its various levels. A model for managing green production at three levels (federal, regional and enterprise level) is proposed, including functions, principles, methods and tools. The model of green production is based on the following functions: stimulation associated with the creation of motivation for enterprises to conduct environmental activities; redistribution of environmental activities, products and pollution between manufacturing enterprises; regulation of environmental activities, products and pollution of enterprises and organizations; a supervisory function related to environmental activity, product and pollution control activities; accumulating function, which is to create the necessary financial and environmental reserve. This model can be used by the environmental services of various enterprises, the Ministry of Natural Resources and Ecology when developing a development strategy, the Department of Economics, Innovation and Scientific and Technical Policy to develop innovative concepts of environmental policy in the regions of the Russian Federation.

Keywords: green production, greening production, management in the field of environmental management, management of environmentally friendly production, management system.

Сложившаяся в регионах практика экологического производства не способствует экологическому оздоровлению природной среды в России и её регионах, а нередко наносит вред окружающей среде (ОС). Экономический подъём при нарастании негативных тенденций природоресурсоёмкости производства может привести к обострению экологической ситуации в России и её регионах, что делает актуальной задачу повышения экологизованности производства на всех уровнях регулирования. Такое регулирование в настоящее время осуществляется государственными территориальными органами через систему их нормативно-законодательной, экологической, экономической, социальной, управленческой, плановой и контрольной деятельности в соответствии с действующим законодательством. Ужесточение норм экологического права усиливает значимость экологических аспектов экономики. Однако комплексный подход к управлению экологизованным производством (ЭП) на различных уровнях управления к настоящему времени в полной мере не сформирован.

За рубежом в теории и практике в последнее время часто используется понятие «зелёное производство», которое отражает обязательства производителей проводить широкую и долгосрочную оценку воздействия своей деятельности и тем самым влиять на качество жизни и благосостояние людей, защиту и безопасность, экономический рост, социальную и экономическую справедливость. Всё чаще этот термин используется взаимозаменяемо с понятием «устойчивого развития».

В работах зарубежных учёных [1–8] термин «зелёное производство» используется

взаимозаменяемо с понятием «устойчивого развития», и означает процесс экологических, социальных и экономических изменений при эксплуатации природных ресурсов. В работе [9] рассматривается проблема достижения устойчивости в качестве «беспрецедентного источника коммерческих возможностей для конкурентоспособных компаний посредством технологических инноваций и повышения экологической эффективности производства».

В работах [10, 11] «зелёное производство» рассматривается как «применение экологически и социально чувствительных методов для уменьшения негативного воздействия производственной деятельности при одновременном согласовании усилий по получению экономических выгод».

В 2001 г. авторы работ [12, 13] признали чрезвычайную важность экологических проблем в основных исследованиях по стратегии производства и эксплуатации и высказались за проведение большего числа исследований в этой области. В октябре 2007 г. Рахимифард и Клегг в своей редакции специального выпуска по устойчивому проектированию и производству для международного журнала производственных исследований [14] пришли к выводу, что существует срочная и настоятельная необходимость в дальнейших исследованиях на каждом этапе жизненного цикла продукта в области «зелёного производства».

Среди отечественных учёных заметный вклад в развитие взаимоотношений общества и природы внесли В.Г. Афанасьев, В.И. Вернадский, В.И. Данилов-Данильян, В.А. Коптюг, Н.Н. Моисеев, Н.Ф. Реймерс, Т.С. Хачатуров и др. [15].

Во второй половине XX века теорию экономического развития в контексте устойчивости разрабатывали Р.Г. Абдулатипов, Г.В. Белов, С.Н. Бобылева, А.В. Дорждеев, В.А. Коптюг, В.В. Леонтьев, В. Лойтер, Д.С. Львов, Н.Н. Лукьянчикова, Р.М. Нуреев, Ю.В. Олейников, Н.В. Пахомова, С.А. Пегов, Р.А. Перелета, В.В. Садовский, А.Д. Урсул, Э.Г. Юдина и др. [16].

Изучением проблем ЭП занимались Н.Ф. Газизуллин, Т.Н. Губайдуллина [17]. Проблемы государственного управления ЭП отражены в работах М.А. Данченко, Л.Г. Елкина, В.М. Зыкова, С.М. Федоренко и др. [17].

Целью исследования является разработка теоретических положений, методологических и практических рекомендаций по формированию модели управления экологизированным производством.

Материалы и методы исследования

Эмпирическую основу исследования составили публикации научной и нормативно-правовой литературы по проблематике управления ЭП. Подборка составила 22 издания, включающих работы отечественных и зарубежных учёных, которые индексируются в базах данных РИНЦ, Scopus и Web of Science. Для поиска использовали системы eLIBRARY.RU и Elsevier.com по ключевым словам и словосочетаниям: «зелёная экономика», «управление зелёным производством», «экологизированное производство», «механизмы управления», «уровни управления». Отбор работ проводили на основе принципов значимости и целесообразности решения задач исследования. Кроме того, большое внимание уделялось информационным источникам в виде докладов и отчётов федеральных и региональных служб экологического мониторинга и контроля. Литературный обзор охватил публикации с 90-х гг. XX века, когда становились современные подходы к управлению ЭП.

Статистическую основу составляют данные Федеральной службы государственной статистики и её территориального органа в Пензенской области. Они использовались для получения аналитического материала на федеральном и региональном уровнях.

Результаты и обсуждение

В центре внимания российских учёных теоретически не разработанной остаётся проблема формирования системы управле-

ния ЭП на различных уровнях: федеральном, региональном и уровне предприятия. Такая система должна включать комплекс взаимосвязанных мероприятий на каждом из указанных уровней, которые направлены на совершенствование технологии производства, его материально-техническое обеспечение, на уменьшение степени загрязнения ОС.

В России в сфере охраны ОС задействован 21 орган и 12 министерств. На рисунке 1 представлена структура органов управления ЭП на трёх уровнях: федеральном, региональном и уровне предприятия. Федеральный уровень представлен законодательной и исполнительной властью, которые формируют основные законы, нормы, правила по защите ОС. Региональный уровень включает Городскую Думу и региональные органы по защите ОС, которые соблюдают основные требования федерального уровня и осуществляют контроль. Уровень предприятия включает экологический менеджмент, который придерживается основных требований федерального и регионального уровней управления.

Немаловажную роль в системе управления природоохранной деятельностью играют неформальные институциональные организации. К ним относятся различные общественные структуры, занимающиеся вопросами экологии и охраны ОС. Это неправительственные организации, которые финансируются только за счёт пожертвований граждан и частных благотворительных фондов. На рисунке 1 на каждом уровне управления представлены основные группы показателей по ЭП.

На федеральном уровне формируются пороговые значения уровня загрязнения ОС (выбросы в атмосферу в расчёте на одного жителя (т/чел.); сброс загрязнённых вод в расчёте на одного жителя (л/чел.); степень развития утилизации и обезвреживания производства и потребления).

На региональном уровне управления – это показатели, отражающие количество уловленных и обезвреженных веществ, сбрасываемых в атмосферный воздух (тыс. т); объём оборотной и последовательно используемой воды (млн м³), инвестиции в основной капитал, направленные на охрану ОС (млн руб.).

Уровень предприятия – это показатели, отражающие расходы на проведение мероприятий по сохранению ОС (млн руб.); расходы по утилизации и обезвреживанию веществ, сбрасываемых в атмосферный воздух и водный бассейн (млн руб.).

Для анализа степени экологизированности производства были приняты следующие

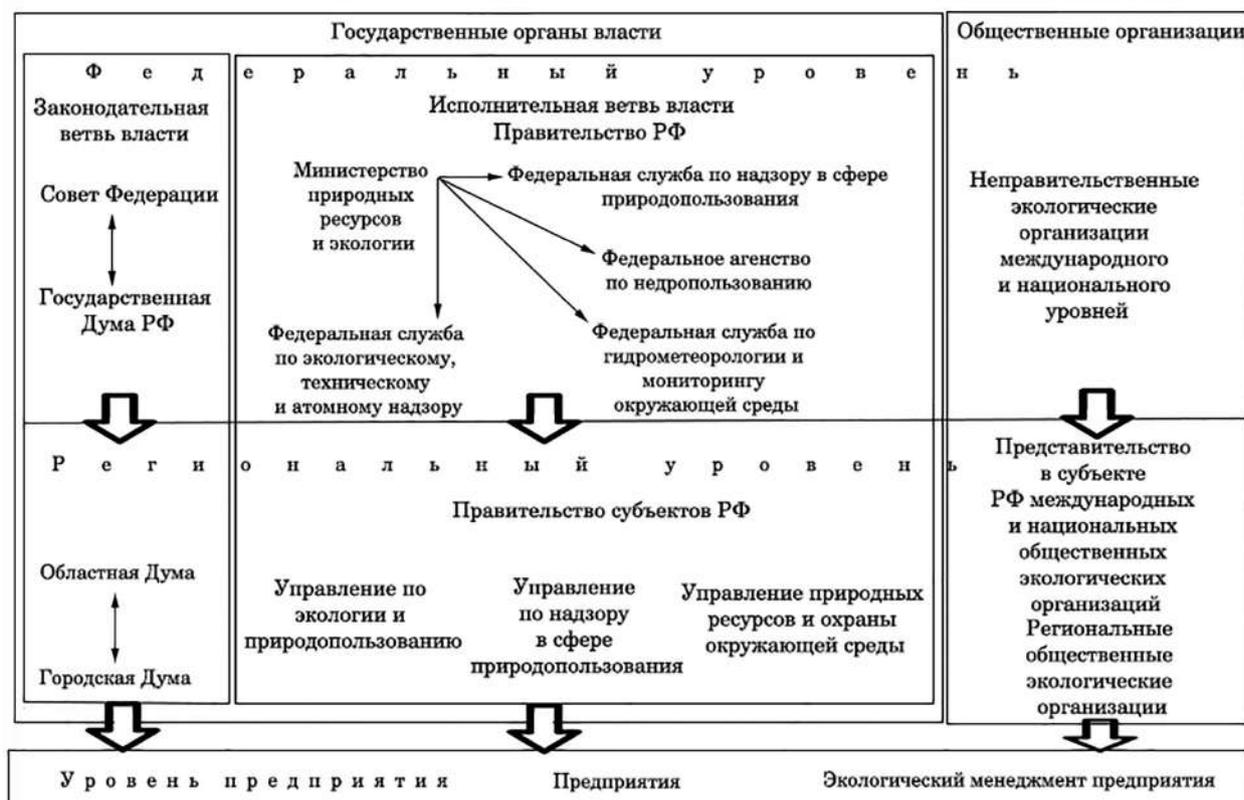


Рис. 1. Структура органов управления экологизированным производством РФ
 Fig. 1. Structure of governing bodies of ecologized production in the RF

Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды в РФ (млн руб.) [18]
 Investments in fixed assets aimed at protecting the environment in the RF (mil rub.) [18]

Показатели Indicators	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Всего инвестиций Total investments	123807	158636	151788	139677	154042	157651	175029	195962
Из них на охрану: From them to the guard:								
– водных ресурсов water resources	41196	55587	40120	40340	60199	65475	70250	69560
– атмосферного воздуха atmospheric air	59505	76315	78962	67469	67469	62750	71805	91275
– земель / lands	13802	14540	15703	12228	10216	10011	12158	15303

показатели: инвестиции в основной капитал, направленные на охрану ОС и рациональное использование природных ресурсов, степень загрязнения атмосферного воздуха.

Динамика инвестиций в основной капитал, направленных на охрану ОС и рациональное природопользование ресурсов Российской Федерации (РФ), на федеральном уровне представлена в таблице.

Анализ динамики инвестиций в основной капитал, направленных на защиту ОС, показывает рост с 89094 млн руб. в 2010 г. до

158636 млн руб. в 2014 г. Данные результаты благоприятно сказались на уменьшении степени загрязнения ОС с 32,3 млн т в 2010 г. до 31,2 млн т в 2017 г. В то же время за анализируемый период отмечен рост количества промышленных предприятий, что привело к увеличению выбросов в атмосферу с 31,2 млн т в 2015 г. до 31,6 млн т в 2017 г.

На региональном уровне экологизированность производства в Пензенской области происходит медленно, затраты на охрану ОС и рациональное природопользование непостоянны.

Можно заметить почти схожую тенденцию в Пензенской области и по России в целом. Инвестиции в основной капитал в Пензенской области, направленные на защиту ОС, составили в 2010 г. 120 млн руб., количество выбросов в этом же году находилось на уровне 22 тыс. т. Все последующие годы в Пензенской области инвестиции в основной капитал на защиту ОС находились приблизительно на одинаковом уровне: 44,6 млн руб. в 2014 г., 44,5 млн руб. в 2016 г. В то же время количество выбросов в атмосферу загрязняющих веществ возрастало с каждым годом, как показали результаты анализа (с 33 тыс. т в 2014 г. до 44 тыс. т в 2016 г.). Данные результаты исследования по Пензенской области хорошо коррелируют с данными по России в целом [19, 20].

По материалам статистики на 2016 г. около 98% промышленных предприятий Пензенской области проводили природоохранные мероприятия. На затраты по утилизации твёрдых отходов производства приходилось 20,4% всех природоохранных инвестиций в основной капитал, а на охрану водных ресурсов региона – 70%, направленных на охрану атмосферы – 9,6% по данным на 2016 г. В этот же период около 70% очистных сооружений работали неэффективно, хотя и отвечали данным проектным режимов [20]. Однако проектные режимы и документация готовились по типовым проектам, разработанным в 60–70-х годах, и современным экологическим требованиям не отвечают. В связи с этим требуется пересмотр основных нормативных документов и нормативных показателей для предприятий регионов, внедрение экологически безопасного оборудования.

В 2016 г. внедрениями инноваций, в том числе в сфере экологизированности региона, занимались лишь 8,1% промышленных предприятий и 12,2% организаций сферы услуг [21]. Это очень маленькая доля для внедрения инноваций по экологизации производства.

В то же время некоторые предприятия Пензенской области самостоятельно приняли решение о внедрении системы экологического менеджмента. Одним из первых проект по разработке и внедрению системы экологического менеджмента стартовал в 2009 г. в ООО «Горводоканал» г. Пенза. Исполнителем по проекту выступила консультационная фирма «М-РЦБ» – одна из крупнейших консалтинговых компаний России в области экологии.

В начале 2012 г. Сертификат соответствия системы экологического менеджмента требованиям международного стандарта ИСО

14001:2004 в отношении разработки, производства и реализации лекарственных средств получил ОАО «Биосинтез».

18 июля 2012 г. сертификаты ISO менеджмента качества и экологического менеджмента выданы ООО ПКФ «Полёт», в этом же году их получил ОАО «Завод ГРАЗ», а годом ранее их получил ОАО «Пензтяжпромарматура», ООО «Эдельвейс» – в 2016 г.

Однако, что касается внедрения системы экологического менеджмента органами Правительства Пензенской области на региональном уровне, то на данном этапе не существует единого экологически направленного комплекса мер по стимулированию ЭП предприятий в регионе. Несмотря на то, что постановлением Правительства Пензенской области от 06.02.2006 № 50 было образовано Управление природных ресурсов и охраны окружающей среды Пензенской области, данным органом проводятся лишь локальные мероприятия по уменьшению вредного воздействия промышленного производства на ОС региона, а не на его предотвращение [21].

Несмотря на это, в настоящее время в регионе наблюдается развитие сети экологически ориентированного предпринимательства с созданием предприятий по сбору и утилизации отходов производства и потребления с целью вовлечения их в хозяйственный оборот. Сейчас в области создано 52 пункта приёма вторсырья, из них: 20 – в г. Пензе и 32 – в районах области.

Разработанная модель управления ЭП на трёх уровнях поможет снизить уровень антропогенной нагрузки и внесёт значительный вклад в защиту ОС. Предложенная модель управления ЭП отражает принципы, механизмы, включающие методы и инструменты на каждом из трёх уровней управления (федеральном, региональном и уровне предприятия) (рис. 2).

Управление ЭП выполняет следующие функции: стимулирование, связанное с созданием мотивации предприятий по проведению экологической деятельности; перераспределение экологической деятельности, продукции и загрязнения между предприятиями-производителями; регулирование экологической деятельности, продукции и загрязнения предприятий и организаций; контролирующая функция, связанная с действиями контроля экологической деятельности, продукции и загрязнения; аккумулирующая функция, которая заключается в создании необходимого финансового и экологического резерва.



Рис. 2. Модель управления экологизированным производством
Fig. 2. Management model of green production

Многоуровневое управление ЭП должно базироваться на использовании таких принципов, как сохранение и восстановление экологических подсистем; внедрение прогрессивных технологий производства; создание и внедрение малоотходных и безотходных производств; экологически приемлемое размещение и территориальная организация производства [22].

К нефискальным методам, которые рассмотрены в модели управления ЭП, относятся следующие инструменты: законодательная база по охране ОС, экологический контроль, экологическое страхование, экологическая экспертиза, экологический мониторинг, аудит, экологические нормы и требования.

Экономические методы управления классифицированы по принципу пополнения государственного бюджета и его расходов. Методы, связанные с расходами государственного бюджета, включают инвестирование

природоохранных мероприятий, поддержку НИОКР, направленных на охрану ОС, кредитный механизм, рыночное квотирование, экономическое стимулирование предприятий, направленное на природоохранную деятельность, экологонаправленную занятость населения, предоставление экологических льгот регионам и предприятиям, экологическую пропаганду населения по сохранению ОС. Инструменты: экологические инвестиции, экологические квоты и кредиты, экологическая занятость населения и экологические льготы, профилактика заболеваемости населения.

Заключение

Анализ отечественного и зарубежного опыта по формированию организационно-управленческой системы управления ЭП показал:

– низкий уровень капиталовложений предприятий России в экологические инвестиции, что отражается на качестве ОС;

– стимулирование предприятий к осуществлению экологизированной деятельности должно проводиться с использованием инструментов налогообложения, квотирования, льготного кредитования проектов безотходного производства;

– несовершенство механизмов управления ЭП в России на федеральном, региональном и локальном уровнях за счёт несогласованности действия разных ветвей власти и общественных организаций.

В ходе проведённого исследования систематизированы и структурированы сведения об органах управления ЭП в России на организационно-иерархической основе; предложена система управления ЭП на основе разделения механизмов регулирования на федеральном, региональном и локальном (предприятие) уровнях.

Современная система управления ЭП в России требует скорейшего повышения эффективности использования за счёт согласованности действий органов управления на федеральном, региональном и локальном уровнях. Повышение качества ОС – главный показатель эффективности.

Статья подготовлена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-010-00875 А «Проблемы управления устойчивого социально-эколого-экономического развития России и пути их решения».

References

1. Dobers P., Wolff R. Competing with “soft” issues – from managing the environment to sustainable business strategies // *Business Strategy and the Environment*. 2000. No. 9 (3). P. 143–150. doi: 10.1002/(SICI)1099-0836(200005/06)9:33.0.CO;2-C
2. Kleindorfer P.R., Singhal K., van Wassenhove L.N. Sustainable operations management // *Production and Operations Management*. 2005. V. 14. No. 4. P. 482–492. doi: 10.1111/j.1937-5956.2005.tb00235.x
3. Seliger G., Kim H., Kernbaum S., Zettl M. Approaches to sustainable manufacturing // *International Journal of Sustainable Manufacturing*. 2008. V. 1. No. 1/2. P. 58–77. doi: 10.3901/CJME.2007.01.086
4. Ball P.D., Evans S., Levers A., Ellison D. Zero carbon manufacturing facility – towards integrating MEW process flows // *Proc. I MechE Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009. V. 223. No. 9. P. 1085–1096. doi: 10.1243/09544054JEM1357
5. Kleiner A. What does it mean to be green? // *Harvard Business Review*. 1991. V. 69. No. 4. P. 38–47.
6. Videras J., Alberini A. The appeal of voluntary environmental programs: Which firms participate and why? // *Contemporary Economic Policy*. 2000. V. 18. No. 4. P. 449–461. doi: 10.1111/j.1465-7287.2000.tb00041.x
7. Wernet G., Conradt S., Isenring H.P., Jimenez-Gonzalez C., Hungerbuhler K. Life cycle assessment of fine chemical production: A case study of pharmaceutical synthesis // *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. V. 15. No. 3. P. 294–303. doi: 10.1007/s11367-010-0151-z
8. Williamson D., Lynch-Wood G., Ramsay J. Drivers of environmental behaviour in manufacturing SMEs and the implications for CSR // *Journal of Business Ethics*. 2006. V. 67. No. 3. P. 317–330. doi: 10.1007/s10551-006-9187-1
9. Elkington J. *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. Oxford: Capstone Publishing, 1997. P. 29–33.
10. Hart S.L. A natural-resource-based view of the firm // *Academy of Management Review*. 1995. V. 20. No. 4. P. 986–1014. doi: 10.2307/258963
11. Saha M., Darnton G. Green companies or green companies: Are companies really green, or are they pretending to be? // *Business and Society Review*. 2005. V. 110. No. 2. P. 117–157. doi: 10.1111/j.0045-3609.2005.00007.x
12. Mohanty R.P., Deshmukh S.G. Managing green productivity: Some strategic directions // *Production Planning Control*. 1998. V. 9. No. 7. P. 624–633. doi: 10.1080/095372898233614
13. Dangayach G.S., Deshmukh S.G. Manufacturing strategy: Literature review and some issues // *International Journal of Operations Production Management*. 2001. V. 21. No. 7. P. 884–932. doi: 10.1108/01443570110393414
14. Chien M.K., Shih L.H. An empirical study of the implementation of green supply chain management practices in the electrical and electronic industry and their relation to organizational performance // *International Journal of Environment Science and Technology*. 2007. V. 4. No. 3. P. 383–394.
15. Reznik G.A., Malyshev A.A. Mechanisms for managing the sustainability of the ecological and economic system // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Povolzhskiy region. Obshchestvennyye nauki*. 2012. V. 4. P. 138–145 (in Russian).
16. Reznik G.A., Malyshev A.A. Mechanisms of economic motivation of enterprises in the conditions of sustainability of the ecological and economic system // *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie*. 2012. V. 2. No. 16. P. 63–68 (in Russian).
17. Reznik G.A., Malyshev A.A. Analysis and assessment of the sustainability potential of the ecological and economic system // *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2012. V. 1. P. 197–204 (in Russian).

18. Investment activity in the Penza region. Statistical information Government of the Penza Region JSC “Penza Region Development Corporation” [Internet resource] https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_zatr4.xls (Accessed: 27.08.2018).

19. State Report “On the state of natural resources and environmental protection of the Penza Region in 2016” [Internet resource] <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/subjects/pfo/penzenskaya-oblast/> (Accessed: 24.05.2018).

20. State Report “On the state of natural resources and environmental protection of the Penza Region in 2017”

[Internet resource] <http://www.prirodnadzor-penza.ru/> (Accessed: 09.01.2019).

21. Socio-economic situation of the Penza Region in January-February 2017: report [Internet resource] http://pnz.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/pnz/resources/d02b6c004-e4cb307ab25bf2a1eb3f7f6/of_2017.pdf (Accessed: 24.05.2018).

22. Sokolskaya E.V., Kochurov B.I., Dolgov Yu.A., Lobkovsky V.A. A multi-factor model as the basis for the environmental quality management of urban areas // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 26–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-026-034

К вопросу методического обеспечения определения содержания редкоземельных элементов для производственного контроля

© 2022. Т. С. Уланова, д. б. н., зав. отделом, М. В. Волкова, н. с.,
Г. А. Вейхман, к. фарм. н., в. н. с., А. В. Недошитова, н. с.,
Федеральный научный центр медико-профилактических
технологий управления рисками здоровью населения,
614045, Россия, г. Пермь, ул. Монастырская, д. 82,
e-mail: volkova@fcrisk.ru

Представлены новые методические разработки для определения редкоземельных элементов (РЗЭ) в воздухе рабочей зоны и цельной крови в широком диапазоне концентраций методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Предложено использовать разработанные методики для производственного контроля на предприятиях добывающей и металлургической промышленности. Для оценки достаточности мероприятий по организации безопасности и снижению вредных производственных факторов, наряду с контролем качества воздуха рабочей зоны, рекомендуется использовать тест на определение РЗЭ в крови рабочих. Методики внесены в Федеральный реестр измерений: ФР.1.31.2018.31642 для цериевой группы; ФР.1.31.2018.31641 для иттриевой группы в воздухе рабочей зоны, получен патент № 2697479; ФР.1.31.2019.32618 для определения РЗЭ в крови, патент № 2696011.

Разработанные методики соответствуют современным требованиям стандартизации и метрологической аттестации, обладают высокой чувствительностью и селективностью. Методики успешно апробированы на металлургическом предприятии при определении концентраций РЗЭ в крови рабочих и воздухе рабочей зоны.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, токсичность, воздух рабочей зоны, кровь, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

To the question of methodological support for determination of rare earth elements for industrial inspection

© 2022. T. S. Ulanova ORCID: 0000-0002-9238-5598[†]
M. V. Volkova ORCID: 0000-0002-0600-4075[†]
G. A. Veikhman ORCID: 0000-0002-8490-7624[†]
A. V. Nedoshitova ORCID: 0000-0001-6514-7239[†]

Federal Scientific Center for Medical and
Preventive Health Risk Management Technologies,
82, Monastyrskaya St., Perm, Russia, 614045,
e-mail: volkova@fcrisk.ru

The purpose of the study is the development of methodological support for the determination of rare earth elements (REE) in workplace air and biological media (blood) of workers. New methodical guidelines for the determination of REE in the workplace air and whole blood in a wide range of concentrations by the method of inductively coupled plasma mass spectrometry are presented. It is proposed to use these methods for production control at the enterprises of mining and metallurgical industries. Also it is recommended to use the test for the determination of REE in biological media (blood) of workers to assess the sufficiency of measures for organizing safety and reducing harmful production factors, along with monitoring the air quality of the working area. The methods are included in the Federal Register of Measurements: FR.1.31.2018.31642 for the cerium group; FR.1.31.2018.31641 for the yttrium group in the air of the working area, patent No. 2697479; FR.1.31.2019.32618 for the determination of REE in blood, patent No. 2696011.

The developed methods meet the modern requirements of standardization and metrological certification, they have high sensitivity and selectivity. The methods have been successfully approbated at a metallurgical enterprise for determining the concentrations of REE in the blood of workers and in the workplace air.

Keywords: rare earth elements, toxicity, workplace air, blood, mass spectrometry with inductively coupled plasma.

В связи с возрастающим интересом к редкоземельным элементам (РЗЭ), наращиванием темпов добычи, получения чистых металлов и производства продукции с их использованием растёт нагрузка на работников, связанных с редкоземельной отраслью промышленности [1–3]. Токсичность РЗЭ изучена недостаточно, также мало сведений об их биологической роли в организме человека [4, 5]. Ряд зарубежных авторов выдвигают предположения, что РЗЭ могут вызывать окисление липидов, обладать гепатотоксичностью, вызывать анемию, а также имеют склонность к биоаккумуляции [6–14].

В Российской Федерации (РФ) установлены нормативы по содержанию некоторых РЗЭ и их соединений в воздухе рабочей зоны в СанПиН 1.2.3685-21 в виде показателей предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочных безопасных уровней воздействия (ОБУВ). Максимально разовые ПДК в воздухе рабочей зоны установлены для Се, Sm (5 мг/м³), Y (2 мг/м³). Для прочих РЗЭ установлены ОБУВ: La, Pr, Nd – 6 мг/м³; Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu – 4 мг/м³.

В России существуют утверждённые методики измерения содержания РЗЭ в воздухе рабочей зоны, основанные на методах спектрографии (МУ № 2240-80), фотометрии (МУК № 2250-80), пламенной фотометрии (МУ № 2011-79), атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) (ГОСТ Р ИСО 15202-2-2014). Значительная часть методик не отвечает современным требованиям по достоверности, селективности и чувствительности. Действующие методики измерения концентрации РЗЭ в воздухе рабочей зоны позволяют определять только отдельные элементы, в настоящее время в РФ не существует ни одной методики, позволяющей из одной пробы определить весь ряд РЗЭ с использованием высокочувствительного селективного метода анализа. В РФ отсутствуют утверждённые методики определения РЗЭ в биологических средах и нормативы их содержания.

В настоящее время по аналитическим возможностям одним из ведущих методов определения элементов в различных объектах является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Метод позволяет определять в одной пробе несколько элементов одновременно, селективно и в широком диапазоне концентраций. Чувствительность метода соответствует задаче по определению широкого диапазона значений содержания элементов.

Таким образом, необходима разработка методик по определению РЗЭ для оценки эффективности и достаточности мероприятий по снижению воздействия вредных производственных факторов в рамках производственного контроля.

Цель исследования – разработка методического обеспечения определения РЗЭ в воздухе рабочей зоны и крови рабочих.

Объекты и методы исследования

Результаты исследований содержания РЗЭ в воздухе рабочей зоны не представлены в научной литературе, что может быть связано с некоторой закрытостью производств. Для определения РЗЭ в аэрозолях воздуха в зарубежных и отечественных исследованиях чаще всего используют метод ИСП-МС. В качестве процедуры подготовки проб в подавляющем числе работ используется разложение в микроволновой системе с использованием различных смесей кислот и разных условий подготовки [12–17]. Перечень и характеристика действующих в РФ методик по определению РЗЭ в воздухе рабочей зоны приведены в таблице 1.

Следует отметить, что пределы обнаружения различных спектральных методов анализа имеют большие отличия. Спектрография и фотометрия могут быть использованы для определения лишь высоких концентраций элементов в пробах, кроме того обладают высокой погрешностью измерения. Процедура подготовки проб для осуществления используемых методик отличается длительностью и потребностью в большом количестве реактивов. Чувствительности метода ИСП-АЭС зачастую бывает недостаточно, что усложняет пробоподготовку за счёт стадии концентрирования пробы.

К недостаткам метода также следует отнести высокий расход газа, высокую стоимость оборудования, частое техническое обслуживание и замену деталей при рутинном анализе сред со сложной матрицей, наличие спектральных интерференций. Для получения низких пределов обнаружения целесообразнее использовать метод ИСП-МС. Этот метод, наряду с ИСП-АЭС, применим при анализе большого количества проб. ГОСТ Р ИСО 30011-2017 регламентирует использование метода ИСП-МС для анализа воздуха рабочей зоны, однако в перечень металлов включён только иттрий.

В зарубежных исследованиях для анализа крови также в основном используется метод ИСП-МС [18–20]. Данные по исследованию крови представлены в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

Действующие методики определения РЗЭ в воздухе рабочей зоны
Current methods for the determination of REE in the workplace air

№ п/п No.	РЗЭ и их соединения REE and their compounds	Условия пробоподготовки Sample preparation conditions	Метод анализа, методика Analysis method, technique	Метрологические характеристики Metrological characteristic
1	Оксиды Oxides La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	Фильтр растворяют в 10 мл царской водки (смесь HCl + HNO ₃ 3 : 1), упаривают досуха, сухой остаток прокалывают в муфельной печи	Спектрография МУ № 2240-80	Предел обнаружения: 1 мг/м ³ Погрешность определения: ±40% Диапазон измеряемых концентраций: 1–20 мг/м ³
2	Оксид иттрия Yttrium Oxide	Озоление в муфельной печи	Пламенная фотометрия МУ № 2011-79	Чувствительность определения: 5 мкг в 1 мл раствора
3	Sm	Фильтр растворяют в 10 мл 15% азотной кислоты, выпаривают на водяной бане, приливают 5 мл 10% уксусной кислоты, выдерживают до растворения осадка, добавляют 0,4 мл 0,05% раствора арсеназоIII	Фотометрия МУК № 5913-91	Диапазон измеряемых концентраций от 1,0 до 60 мг/м ³ Погрешность измерения не превышает ±20%
4	Ce	Растворение в HCl и добавление 0,5 мл 10% H ₂ O ₂	Фотометрия МУ № 2250-80	Диапазон измеряемых концентраций от 0,5 до 10 мг/м ³ Граница суммарной погрешности измерения не превышает ±20%
5	Y	Растворение проб в смеси азотной и хлорной кислот, или азотной и соляной с применением нагрева на электрической плитке. Возможно растворение в термоблоке при 95 °С	ИСП-МС ИСО 30011:2010	Погрешность определения от 0,5 до 2 ПДК < 30%, при 0,1–0,5 ПДК < 50%
6	Y	Различные смеси кислот в зависимости от способа пробоподготовки (нагревание на плитке, микроволновое разложение проб, разложение в термоблоке)	ИСП-АЭС ГОСТ Р ИСО 15202-2-2014	Погрешность определения от 0,5 до 2 ПДК < 30%, при 0,1–0,5 ПДК < 50% Предел обнаружения: 0,6 мкг/л, предел определения: 2,1 мкг/л

Как следует из таблицы 2, применение метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволяет определять весь спектр РЗЭ, в том числе и их следовые количества [21].

Результаты и обсуждение

На базе ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» нами разработаны методики определения РЗЭ в воздухе рабочей зоны (ФР.1.31.2018.31642 «Методика измере-

ний массовых концентраций редкоземельных элементов цериевой группы в воздухе рабочей зоны методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой»; ФР.1.31.2018.31641 «Методика измерений массовых концентраций редкоземельных элементов иттриевой группы в воздухе рабочей зоны методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой», патент № 2697479), а также в крови (ФР.1.31.2019.32618 «Методика измерений массовых концентраций РЗЭ в крови методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой»). Диапазоны измерения и показа-

тели точности разработанных методик приведены в таблице 3.

Для определения разовой концентрации РЗЭ пробу воздуха аспирировали через фильтры АФА-ХП-20 или АФА-ХА-20 аспиратором ПУ-3Э («12», ТУ 4215-000-11696625-2003, Россия) в объеме около 100 дм³ в зоне дыхания рабочего при характерных производственных условиях. Время отбора проб воздуха 15 мин.

При разложении фильтров АФА-ХП и АФА-ВП в муфельной печи ПДП-18М (ТУ 3443-001-3630408, Россия) их помещали в кварцевые стаканчики (ТУ 21-23-238, Россия), приливали 0,1 мл этилового спирта (ГОСТ Р 51652-2000, Россия), добавляли 0,2 мл 20% раствора аммония сульфата (х. ч., ГОСТ Р 51652-2000, Россия) в деионизиро-

ванной воде. Выдерживали в муфельной печи при температуре около 100 °С 40–60 мин, далее при температуре 250 °С 40–60 мин, далее озоляли при температуре 450–500 °С 3–3,5 ч. Образовавшуюся золу смачивали 0,3–0,5 мл концентрированной азотной кислоты (плотность 1,415 г/см³), нагревали на песчаной бане и упаривали до состояния влажных солей. Остаток растворяли в 5 мл 1% азотной кислоты, доводили объем до 10 мл 1% азотной кислотой.

Микроволновое разложение фильтров проводили в системе микроволнового разложения SW-4. Разложение проводили во фторопластовых автоклавах. Фильтры АФА-ХА помещали во фторопластовые стаканы, добавляли 10 мл концентрированной азотной кислоты (плотностью 1,415 г/см³), выдерживали

Таблица 2 / Table 2

Методики определения РЗЭ в крови человека
Methods for determining REE in human blood

Определяемые элементы и предел обнаружения, мкг/л Elements and detection limit, µg/L	Анализируемый образец Analyzed sample	Способ пробоподготовки Sample preparation method	Литература References
Y 0,006 La 0,008 Ce 0,008	цельная кровь	500 мкл крови разводят 100 мкл 0,1% Triton-X-100 и 500 мкл раствора внутреннего стандарта (ВС). Полученную пробу доводят до 5 мл 0,5% раствором NH ₄ OH	[18]
Ce 0,0006 Dy 0,0002 Er 0,0002 Eu 0,0005 Gd 0,0004 Ho 0,0001 La 0,0009 Lu 0,0002	Pr 0,0003 Sc 0,005 Sm 0,0004 Tb 0,0001 Tm 0,0002 Y 0,001 Yb 0,0006 Nb 0,0007	К 1 мл пробы приливают 1,5 мл HNO ₃ , разбавленной бидистиллированной водой, разложение в течение 30 мин при 300 Вт. Доводят до 10 мл бидистиллированной водой. В пробы добавляют раствор ВС (In, 20 нг/мл)	[19]
La 0,013 Ce 0,016 Pr 0,008 Nd 0,013 Sm 0,012 Eu 0,006 Gd 0,011	Tb 0,006 Dy 0,011 Ho 0,003 Er 0,014 Tm 0,002 Yb 0,006 Lu 0,002	К 1 мл крови приливают 2 мл 70% HNO ₃ и 1 мл 30% перекиси водорода, выдерживают в печи 1 ч при 120 С. После охлаждения раствор доводят до 50 мл 5% HNO ₃	[8]
Ce 0,0006–0,0052 Dy 0,0002–0,0007 Er 0,0002–0,0004 Eu 0,0005–0,0006 Gd 0,0004–0,0017 Ho 0,0001–0,0002 La 0,0009–0,0028 Lu 0,00017–0,00025	Nb 0,0007–0,0034 Pr 0,0003–0,0007 Sc 0,002–0,006 Sm 0,0004–0,001 Tb 0,0001–0,0002 Tm 0,0002–0,0003 Y 0,001–0,003 Yb 0,0006–0,0008	сыворотка крови К 1 мл образца добавляют 9 мл 0,14 моль/л HNO ₃ в деионизированной воде. К образцу добавляют ВС 20 мкг/л (In)	[20]

Таблица 3 / Table 3

Характеристики методик измерения РЗЭ в воздухе рабочей зоны и крови
 Characteristics of methods for determination REEs in workplace air and blood

Элементы Elements	Воздух рабочей зоны / Workplace air		Кровь / Blood	
	диапазон измерения, мг/м ³ range of measured concentrations, mg/m ³	погрешность измерения, % determination error, %	диапазон измерения, мкг/л range of measured concentrations, µg/L	погрешность измерения, % determination error, %
La	0,00003–25	23	0,2–50	21–35
Ce	0,00003–10		0,2–50	19–33
Pr	0,00003–10		0,015–50	17–39
Nd	0,00003–100		0,1–50	21–36
Sm	0,000007–100		0,025–50	17–37
Eu	0,000007–50		0,015–50	15–30
Y	0,00001–25		21	0,1–50
Gd	0,000007–100	0,025–50		15–33
Tb	0,000007–10	0,025–50		15–30
Dy	0,00001–50	0,025–50		19–39
Ho	0,000007–50	0,015–50		17–30
Er	0,000007–50	0,025–50		17–34
Tm	0,000007–10	0,015–50		15–30
Yb	0,000007–100	0,015–50		23–31
Lu	0,000007–25	0,015–50		15–27

10 мин при комнатной температуре, после чего минерализовали пробы в микроволновой системе при температуре 150 °С и давлении 40 бар 5 мин, затем ещё 5 мин при температуре 170 °С и давлении 40 бар. После остывания в течение 20 мин объём пробы доводили до 10 мл деионизированной водой. Перед измерением проводили дополнительное разбавление в 10 раз.

Кислотное растворение проводили в термоблоке для разложения фильтров АФА-ХП, АФА-ХА, АФА-ВП. Фильтр помещали в пробирку для термоблока, добавляли 4,0 мл концентрированной азотной кислоты, выдерживали 2,5–3 ч при температуре 95 °С. После охлаждения объём доводили до 10 мл деионизированной водой. Перед измерением проводили дополнительное разбавление в 10 раз.

При сравнении различных способов пробоподготовки для фильтров с известной концентрацией элементов (1 мкг/л) получены результаты, погрешность которых не превышает 14% для всех способов пробоподготовки. Для определения разовой концентрации пробу воздуха аспирировали на фильтры АФА-ХА-20 аспиратором ПУ-3Э в течение 15 мин в зоне дыхания рабочего при характерных производственных условиях. Общий объём отобранной пробы около 1500 дм³. В качестве холостой пробы использовали не-

экспонированные фильтры из той же партии. Измерения осуществляли на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500cx (Agilent Technologies, USA) с октопольной реакционно-столкновительной ячейкой (ORS).

Подготовку проб крови для определения содержания РЗЭ проводили способом кислотного растворения в пробирочном нагревателе HotBlock™ (№ 2015CECW4259, Environmental Express, New Hampshire, USA). Пробу крови объёмом 0,1 (0,2) мл дозатором вносили в конические градуированные пробирки из полипропилена вместимостью 15 мл, добавляли 0,5 (1,0) мл концентрированной азотной кислоты плотностью 1,415 г/см³, закрывали крышкой, взбалтывали и нагревали 25–30 мин в пробирочном нагревателе при температуре 65–70 °С до гомогенного состояния. Готовый для анализа раствор объёмом 0,5 мл переносили в пробирку автоматического пробоотборника, добавляли 0,05 мл раствора внутреннего стандарта и 4,45 мл 1% раствора азотной кислоты. Для внутренней стандартизации использовали раствор ¹¹⁵In (Single Analyte Mass Spec Solution, MSIN-10PPM, Lot K2-INO1147, INORGANIC VENTURES, USA) с концентрацией 10 мкг/мл в 2% водном растворе HNO₃ при определении содержания РЗЭ. Измерения осуществляли на квадрупольном

масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500сх.

Необходимо отметить, что при кислотном растворении пробы полное разрушение структуры матрицы исследуемого образца не происходит, однако существенно экономится время, затрачиваемое на проведение подготовки образцов, и реактивы. Важным аспектом является то, что необходимый для анализа объем пробы сокращается до 0,1 мл и при использовании данного способа разложения проб значение холостого опыта сводится к минимуму, что также даёт преимущество использованию кислотного растворения.

Для контроля результатов анализа использовали стандартные образцы крови SERONORM L2 и L3 (Sero AS, Billingstad, Norway) с добавкой. Перед проведением анализа сертифицированные контрольные материалы подвергали той же процедуре подготовки, что и рабочие пробы.

Методики успешно апробированы на металлургическом предприятии при определении концентраций РЗЭ в воздухе рабочей зоны и в крови [22].

Апробация методики определения РЗЭ в воздухе рабочей зоны была осуществлена на

металлургическом предприятии, занимающемся, в том числе, производством соединений РЗЭ. Обследовано 4 рабочих места, непосредственно связанных с получением РЗЭ. Обнаружены следующие элементы (в мг/м³): La 0,0003–0,019, Ce 0,00065–0,0036, Pr 0,00006–0,00034, Nd 0,00002–0,0009, Sm 0,00001–0,00006, Eu 0,000007–0,00001, Gd 0,00002–0,000034.

Для оценки эффективности и достаточности мероприятий по производственному контролю выполнены исследования крови работников этого предприятия на содержание в ней РЗЭ. Данные по определению содержания РЗЭ в крови жителей неэкспонированных и экспонированных территорий приведены в таблице 4. Во всех указанных в таблице работах использовали метод ИСП-МС.

Полученные результаты определения содержания РЗЭ в крови работников металлургического предприятия Пермского края соответствуют опубликованным данным.

Заключение

Разработанные методики определения РЗЭ в воздухе рабочей зоны и в крови от-

Таблица 4 / Table 4

Содержание редкоземельных элементов в крови экспонируемых и неэкспонируемых взрослых, мкг/л*
The content of rare earth elements in the blood of exposed and unexposed adults, µg/L*

Элемент Element	Пермский край Perm Krai 2018	Китай China 2014 [8]	Китай China 2003 [23]		Южная Африка South Africa 2017 [11]	Швеция (референтные значения) Sweden (reference value) 2001 [20]
	1	1	2	1	1	2
⁸⁹ Y	0,03–0,044	–	–	–	–	0,013–0,025
¹³⁹ La	0,029–0,105	17,07	0,66	1,71	0–0,03	0,008–0,046
¹⁴⁰ Ce	0,047–0,123	603,13	0,32	1,07	0–0,04	0,014–0,19
¹⁴¹ Pr	0,0076–0,013	1,57	0,04	0,14	0–0,04	0,002–0,02
¹⁴⁶ Nd	0,019–0,070	4,57	0,17	0,61	0–4,8	0,004–0,023
¹⁴⁷ Sm	0,004–0,012	0,67	0,05	0,22	0–0,42	< 0,001–0,015
¹⁵³ Eu	0,0004–0,0005	0,73	0,02	0,05	0–0,04	< 0,0005–0,002
¹⁵⁷ Gd	0,005–0,013	7,7	0,07	0,18	–	0,0013–0,0102
¹⁵⁹ Tb	0,0006–0,004	0,67	0,01	0,04	–	< 0,0002–0,0018
¹⁶³ Dy	0,0006–0,0008	1,17	0,06	0,13	–	< 0,0009–0,0035
¹⁶⁵ Ho	0,001–0,0012	0,43	0,02	0,03	–	0,0003–0,0009
¹⁶⁶ Er	0,0022–0,0047	5,4	0,04	0,08	0–0,02	< 0,0007–0,002
¹⁶⁹ Tm	0,0038–0,0056	0,33	0,01	0,03	–	< 0,0002–0,0005
¹⁷³ Yb	0,0024–0,0045	0,93	0,05	0,12	–	< 0,0008–0,0025
¹⁷⁵ Lu	0,0007–0,0009	0,3	0,02	0,94	–	< 0,0002–0,0005

Примечание: * 1 – кровь экспонируемых взрослых, 2 – кровь неэкспонируемых взрослых, «–» – нет данных.
Note: * 1 – blood of exposed adults, 2 – blood of unexposed adults, a dash indicates no data.

личаются от существующих возможностью определять целый ряд РЗЭ из одной пробы в широком диапазоне концентраций с применением единой схемы пробоподготовки. В связи с востребованностью в различных отраслях промышленности РЗЭ, а также недостаточностью информации об их токсичности и содержании в различных средах, разработанные методики могут быть использованы при оценке эффективности и достаточности мероприятий по производственному контролю. Для этой цели мы предлагаем, наряду с существующими методами контроля в рабочей зоне, проводить тест на содержание РЗЭ в крови работников металлургических и добывающих предприятий.

References

1. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., Chaukura N., Dunjana N., Sanganyado E. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants // *Science of the Total Environment*. 2018. No. 636. P. 299–313. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.235
2. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // *Geoscience Frontiers*. 2019. V. 10. P. 1285–1303. doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005
3. Petrenko D.B., Erofeeva K.G., Okina O.I. Rare earth elements in the environment: concentrations, migration characteristics and methods of determination (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 6–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-006-016
4. Pagano G., Aliberti F., Guida M., Oral R., Siciliano A., Trifuoggi M., Tommasi F. Rare earth elements in human and animal health: State of art and research priorities // *Environmental Research*. 2015. No. 142. P. 215–220.
5. Damian P.P. A literature review of the health and ecological effects of the rare earth elements // *Prepared for rare Element Resources*. 2014. 40 p.
6. Pałasz A., Czekaj P.P. Toxicological and cytophysiological aspects of lanthanides action // *Acta Biochimica Polonica*. 2000. No. 47. P. 1107–1114. doi: 10.18388/abp.2000_3963
7. Rim K.T., Koo K.H., Park J.S. Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: a literature review // *Safety and Health at Work*. 2013. No. 4. P. 12–26. doi: 10.5491/SHAW.2013.4.1.12
8. Li X., Chen Z., Chen Z., Zhang Y. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China // *Chemosphere*. 2013. No. 93. P. 1240–1246. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.085
9. Pagano G., Guida M., Tommasi F., Oral R. Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements – knowledge gaps and research prospects // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. No. 115. P. 40–48. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.01.030
10. Bai Y., Long C., Hu G., Zhou D., Gao X., Chen Z., Wang T., Yu S., Han Y., Yan L. Association of blood chromium and rare earth elements with the risk of DNA damage in chromate exposed population // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2019. No. 72. Article No. 103237. doi: 10.1016/j.etap.2019.103237
11. Henríquez-Hernández L.A., Boada L.D., Carranza C., Pérez-Arellano J.L., González-Antuña A., Camacho M., Almeida-González M., Zumbado M., Luzardo O.P. Blood levels of toxic metals and rare earth elements commonly found in e-waste may exert subtle effects on hemoglobin concentration in sub-Saharan immigrants // *Journal of Environment International*. 2017. No. 109. P. 20–28. doi: 10.1016/j.envint.2017.08.023
12. Ermolin M.S., Fedotov P.S., Ivaneev A.I., Karandashev V.K., Fedyunina N.N. Isolation and quantitative analysis of road dust nanoparticles // *Zhurnal analiticheskoy himii*. 2017. V. 72. No. 5. P. 448–461 (in Russian). doi: 10.7868/S004445021705005X
13. Karandashev V.K., Zhernokleeva K.V., Baranovskaya V.B., Karpov Yu.A. Analysis of high-purity materials by inductively coupled plasma mass spectrometry // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2012. No. 1. P. 17–30.
14. Celó V., Dabek-Zlotorzynska E., Mathieu D., Okonskaia I. Validation of a simple microwave – assisted acid digestion method using microvessels for analysis of trace elements in atmospheric PM in monitoring and fingerprinting studies // *The Open Chemical and Biomedical Methods Journal*. 2010. No. 3. P. 143–152. doi: 10.2174/1875038901003010143
15. Celó V., Dabek-Zlotorzynska E., Zhao J., Okonskaia I., Bowman D. An improved method for determination of lanthanoids in environmental samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with high matrix introduction system // *Analitica Chimica Acta*. 2011. V. 706. P. 89–96. doi: 10.1016/j.aca.2011.08.024
16. Danadurai K.S.K., Chellam S., Lee C., Fraser M.P. Trace elemental analysis of airborne particulate matter using dynamic reaction cell inductively coupled plasma – mass spectrometry: Application to monitoring episodic industrial emission events // *Analytica Chimica Acta*. 2011. V. 686. P. 40–49. doi: 10.1016/j.aca.2010.11.037
17. Dai Q., Li L., Li T., Bi X., Zhang Y., Wu J., Liu B., Gao J., Gu W., Yao L., Feng Y. Atmospheric signature and potential sources of rare earth elements in size – resolved particulate matter in a megacity of China // *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. V. 16. P. 2085–2095. doi: 10.4209/aaqr.2016.03.0108
18. Heitland P., Köster H.D. Biomonitoring of 37 trace elements in blood samples from inhabitants of northern Germany by ICP-MS // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2006. V. 4. P. 253–262. doi: 10.1016/j.jtemb.2006.08.001

19. Rodushkin I., Ödman F., Olofsson R., Axelsson M.D. Determination of 60 elements in whole blood by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2000. V. 15. P. 937–944. doi: 10.1039/b003561k
20. Rodushkin I., Ödman F., Olofsson R., Burman E., Axelsson M.D. Multi-element analysis of body fluids by double-focusing ICP-MS // Recent Research Developments in Pure & Applied Analytical Chemistry. 2001. V. 5. P. 51–66.
21. Gorbatenko A.A., Revina E.I. Instrumental methods for the determination of rare earth elements (review) // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2014. V. 80. No. 4. P. 7–19 (in Russian).
22. Ulanova T.S., Volkova M.V., Stenno E.V., Nedoshitova A.V., Veikhman G.A. Determination of the content of rare earth elements in air aerosols of the workplace air of a metallurgical enterprise by the ICP-MS method // Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya. 2018. No. 10. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.31089/1026-9428-2018-10-28-33
23. Yuan Z., Liu Y., Yu H. Study on relationship between rare earth level in blood and health condition of residents // Chin Publ Health. 2003. V. 19. P. 133–135.

Книжный фестиваль «Красная площадь»

3–6 июня 2022 г. в Москве состоялся VIII книжный фестиваль «Красная площадь». На главной площади страны свои книги представили более 400 отечественных издательств из 60 регионов. Кировскую область на фестивале неизменно с 2015 г. представляет издательство «О-Краткое».

В рамках крупнейшего форума российских книжников традиционно подводили итоги всероссийские книжные конкурсы, и книги вятского издательства в этом году получили награды сразу в двух из них. В 32-м сезоне конкурса Ассоциации книгоиздателей России «Лучшие книги года – 2021» в номинации «Лучшая книга в области гуманитарных наук» издательство «О-Краткое» стало дипломантом за книгу Бенедикта Дыбовского «О Сибири и Камчатке». Это международный проект, в результате которого впервые на русский язык с польского была переведена книга выдающегося учёного и исследователя, принадлежавшего сразу к трём культурам – белорусской, польской и русской. Кроме того, книга Ларисы Францек «Мир колокольчиков», рассказывающая о богатом мире декоративных колокольчиков и выпущенная издательством «О-Краткое», вошла в шорт-лист и удостоилась диплома финалиста в номинации «Культурное наследие» XVIII Всероссийского конкурса региональной и краеведческой литературы «Малая родина», проводимого Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Поздравляем авторов книг-победителей выставки, сотрудников и директора издательства «О-Краткое» с очередными высокими оценками их труда и желаем дальнейших успехов в издательской деятельности во славу Вятского края!

*Редколлегия журнала
«Теоретическая и прикладная экология»*

Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей

© 2022. А. В. Гогонин, аспирант,
Т. Н. Щемелинина, к. б. н., с. н. с.,
Е. М. Анчугова, инженер-исследователь,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tatyanakomi@mail.ru

В стоках предприятий целлюлозно-бумажной промышленности содержатся фенол, азотные соединения, сера, фосфор, ионы железа, алюминия, превышающие предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения. Одним из способов очистки сточной воды от поллютантов является использование микроводорослей. Инокулирование микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* в сточную воду АО «Монди СЛПК» приводит к снижению содержания основных загрязняющих веществ по сравнению с неочищенной сточной водой: азота аммонийного – на 74–79%, нитратного – на 42–44%, общего – на 55–72%, фосфора общего – на 25–50%, серы общей – на 6,4%, фенола – на 62–70%. Использование сточной воды целлюлозно-бумажного предприятия в качестве питательной среды для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* является более эффективным по сравнению с синтетическими и полусинтетическими питательными средами.

Ключевые слова: сточные воды, загрязняющие вещества, микроводоросли, очистка сточной воды, питательная среда.

Utilization of wastewaters as a nutrient medium for the accumulation of microalgal biomass

© 2022. A. V. Gogonin ORCID: 0000-0003-1401-7412*
T. N. Shechemelinina ORCID: 0000-0002-4052-6424*
E. M. Anchugova ORCID: 0000-0002-7912-3518*
Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tatyanakomi@mail.ru

Cultivating microalgae using wastewater nutrients is a potential approach to realize resource recovery that can contribute to circular economy. However, wastewaters discharged from pulp and paper mills contain high concentrations of stable components such as metal ions, phenols, nitrogen compounds, sulfur, phosphorus, that exceed quality standard values, that is why microalgae-based approaches are a solution to cope with wastewater treatment and simultaneous biomass accumulation. To address those problems, we investigated microalgal cultivation fed with nutrients from wastewaters, synthetic, and semi-synthetic media. This study employed the species of *Chlorella* genus adapted for technologies of algal ponds and stepwise bioprocessing approaches. Biotechnological properties of *Chlorella vulgaris* f. *globosa* strain were evaluated in a series of laboratory experiments testing a range of regimes and conditions. Results showed that *C. vulgaris* f. *globosa* grew well on both semi-synthetic Liuk's medium and synthetic conventional media because of its similar nutrient profile to a common algal growth medium, but wastewaters were found to be the most appropriate for scaling up of beneficial acclimatized biomass production. Microalgal inoculation affects the content of major pollutants while treating real wastewater of Mondi Syktyvkar JSC. Nutrients, metal ions, and other recalcitrant pollutants were effectively removed by this strain with removal efficiencies of 74–79% N-NH₄⁺, 42–44% N-NO₃⁻, 25–50% total phosphorus, 6.4% total sulfur, and 62–70% of phenols. After microalgal cells having been deposited and harvested, chemical parameters of the wastewater processed were in compliance with quality standards for fishery waterbodies. It might be useful, in a framework of further studies, to assess toxicity of the biomass harvested and its applicability for agriculture.

Keywords: wastewater, pollutants, microalgae, wastewater treatment, nutrient medium.

Одна из основных экологических проблем – загрязнение природных вод, в том числе сточными водами производственных предприятий [1]. Согласно отчёту, опубликованному Организацией Объединённых Наций в 2017 г., очищается только 20% сточных вод, в то время как остальные 80% сбрасываются без предварительной очистки, что наносит серьёзный ущерб [2].

Большая часть сточных вод загрязнена как органическими, так и неорганическими веществами, способными нарушать пищевые цепи и подвергать опасности жизнь водных обитателей [3, 4].

Биологическая очистка сточных вод, применяемая на большинстве промышленных предприятий [5], имеет перед другими методами ряд значительных преимуществ. Микроорганизмы осуществляют эффективное разложение в стоках органических загрязнителей до минеральных веществ.

Перспективным направлением биологической очистки сточных вод является использование микроводорослей [6–9], позволяющее, с одной стороны, осуществлять очистку воды, с другой стороны, – получать дешёвую биомассу, богатую белками, липидами, витаминами и др., которую впоследствии можно использовать для решения энергетических и сельскохозяйственных задач [10–15].

Актуальность исследования обусловлена решением проблемы очистки сточных вод лесопромышленных комплексов и целлюлозно-бумажных комбинатов для Российской Федерации, являющейся в настоящее время одной из приоритетных в сфере экологической биотехнологии, так как сточные воды данной отрасли содержат широкий перечень загрязнителей (фенолы, нитратный, нитритный, аммонийный азот, фосфаты, сульфаты, ионы металлов и пр.). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ после очистки воды на станции биологической очистки достигаются не по всем показателям, и, как результат, вода на выходе оказывается недостаточно очищенной. Проблему может решить доочистка воды с помощью микроводорослей *Chlorella vulgaris* с одновременным накоплением их биомассы.

Chlorella – один из наиболее распространённых родов зелёных водорослей, менее уязвимый по отношению к загрязнителям, выдерживающий большие концентрации загрязнителей длительного воздействия, толерантен к перепаду температур, потребляет фенолы,

нитраты, фосфаты и сокращает количество бактерий и токсинов в воде [16–20].

Цель работы – оценка возможности совмещения процессов водоочистки сточной воды АО «Монди СЛПК» и культивирования биомассы микроводорослей.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был взят штамм микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024. Хлорелла чаще всего используется в технологиях водорослевых прудов, биоплато и проточных водоёмов для доочистки сточных вод [21, 22]. Относится к альфамезосапробионтным видам, способным выдерживать значительную степень органического загрязнения.

Биотехнологические свойства микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* были проверены в модельных экспериментах. Условия и режимы культивирования микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024 сведены в таблицу 1.

Количественный химический анализ образцов сточных вод был выполнен следующими методами: определение кислотности, pH – потенциометрией; содержание общего азота, $N_{\text{общ}}$ – термокаталитическим окислением; содержание фосфат-, нитрат-, нитрит-ионов, ионов аммония, цветности – фотометрическим методом; Fe, Al, $P_{\text{общ}}$, $S_{\text{общ}}$, хлорид-ионов – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой; фенола – капиллярной хроматографией; взвешенных веществ (ВВ) – гравиметрией.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с применением *t*-критерия Уэлча для расчёта граничных значений доверительного интервала.

Результаты и обсуждение

Микроводоросли *C. vulgaris* f. *globosa* в качестве биотехнологических агентов. Исследована эффективность очистки сточной воды с использованием микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* от основных загрязняющих веществ. Было проведено несколько биотехнологических экспериментов с использованием сточной воды аэротенков и вторичных отстойников с разным режимом и продолжительностью эксперимента, а также инокулированием штаммом с титром клеток 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^8 кл./см³ (табл. 1). Микроводоросли *C. vulgaris* f. *globosa* значительно снижали

Таблица 1 / Table 1

Условия экспериментов, проведённых на сточной воде с использованием микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024
Experiments carried out to treat wastewaters using microalgae *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024

№ No.	Питательная среда Nutrient medium	Титр клеток, кл./см ³ Cell titer, cells/cm ³	Соотношение инокулята и общего объёма, об.% Inoculum to volume ratio, % v/v	Место отбора воды Wastewater sampling site	Условия эксперимента Experimental conditions	Время эксперимента, сутки Exposition, days
1	Среда Тамия Tamiya's medium	10 ⁸	1	аэротенки aerotanks	Компрессор Tetratex APS 400, освещение фитолампой OSRAM L 18W/77 Fluora, 550 лм Air pump Tetratex APS 400, phytolamp lighting OSRAM L 18W/77 Fluora, 550 lm	1
2	Среды Тамия и Люка / Tamiya and Liuk media	10 ⁸				1
3	Среда Люка Liuk's medium	10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶				1
4		10 ⁸		вторичные отстойники secondary settling tanks		12
5	Среда Тамия Tamiya's medium	10 ⁸				1
6	Сточная вода Wastewater	10 ⁸				1
7	Wastewater	10 ⁸				12

Таблица 2 / Table 2

Эффективность очистки сточной воды с использованием микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa*, %
The efficiency of wastewater treatment using *Chlorella vulgaris* f. *globosa* microalgae, %

Снижение содержания основных загрязняющих веществ, % The removal of major pollutants, %					
NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ.} N _{tot.}	P _{общ.} P _{tot.}	S _{общ.} S _{tot.}	фенол phenol
74–79	42–44	55–72	25–50	6,4	62–70

токсический эффект фенола в воде и трансформировали соединения фосфора и азота (табл. 2).

Культивирование маточных культур микроводорослей *C. vulgaris*. Известно, что для культивирования микроводорослей используются различные питательные среды, например, синтетические среды Тамия и Болда [23]. Недостатками использования синтетических сред являются их высокая стоимость по сравнению с другими доступными субстратами, возможность инфицирования как стоковых растворов при хранении, так и большого объёма среды в процессе, а также низкая эффективность при массовом культивировании, так как скорость прироста биомассы на таких средах существенно ниже.

Среда Люка – полусинтетическая питательная среда, включающая в себя минеральный ионит «IonsorbTM», водопроводную воду и стабилизированный куриный помёт и об-

ладающая бактерицидными, фунгицидными и противовирусными свойствами. Она часто используется для культивирования микроводорослей в большом количестве в короткие сроки. Эта среда может использоваться вместо питательных сред Болда и Тамия [24].

Для масштабирования процесса получения биомассы экономически наиболее альтернативным решением является использование сточных вод, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности АО «Монди СЛПК». При внесении маточной культуры микроводорослей в сточную воду, взятую из аэротенков, наблюдали снижение содержания ионов алюминия и железа, биотрансформацию фенолов и биоразложение соединений азота. При этом микроводоросли, маточная культура которых была получена на сточной воде (табл. 3), эффективнее снижали содержание алюминия, железа и общего азота.

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод, что сточная вода АО «Монди СЛПК» в качестве питательной среды не менее эффективна, чем синтетические и полусинтетические питательные среды для культивирования микроводорослей, и является более рентабельной для накопления инокулятов, адаптированных для очистки стоков лесопромышленного комплекса.

Получение биомассы в процессе культивирования микроводорослей на сточной воде отстойников. Инокулирование суспензии микроводорослей в сточную воду приводит, с одной стороны, к интенсификации процессов очистки, а с другой, рост и развитие культуры предполагает насыщение накопленной биомассы макро- и микроэлементами. Удаление клеток микроводорослей из воды путём осаждения и фильтрации приводит к очищению сточной воды до нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [25]. В то же время, микроводоросли, обладая антисептическими свойствами [26, 27], обеззараживают сточную воду, и образуют биомассу, которая может быть использована в сельском хозяйстве для повышения плодородия почв, улучшения роста и развития растений [28].

Был поставлен эксперимент на определение накопления как питательных элементов в процессе культивирования биомассы микроводорослей на сточной воде вторичных отстойников СБО АО «Монди СЛПК» (проба СВМ – сточная вода с микроводорослями), так и на исследование очистки стоков после осаждения и удаления клеток микроводорослей

(проба СВО – сточная вода после осаждения и удаления клеток микроводорослей). В качестве контроля использовали сточную воду без внесения микроводорослей (СВ).

При культивировании микроводорослей *C. vulgaris* на сточной воде отстойников в процессе накопления биомассы за 12 сут происходило окисление аммонийного азота на 38%, нитритного азота – на 43% и трансформация фенола – на 58% (табл. 4) (проба СВМ). В биомассе наблюдалось накопление фосфатов, серы, кальция, небольшое увеличение содержания магния, калия, натрия. Культивирование биомассы микроводорослей в сточной воде, инокулированной микроводорослями (СВМ), повышало содержание меди, бария. Изменение содержания остальных исследованных элементов в пробе происходило в пределах погрешности метода (табл. 4).

После осаждения и удаления микроводорослей из сточной воды (проба СВО) происходило снижение содержания всех исследуемых элементов до норм ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 (табл. 4). Осаждённая биомасса микроводорослей в дальнейшем может быть исследована на токсичность и возможность использования в сельском хозяйстве.

Выводы

1. Установлено, что при инокулировании в сточную воду АО «Монди СЛПК» микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* происходит снижение содержания основных загрязняющих веществ: фенола, соединений азота, серы, фосфора.

Таблица 3 / Table 3

Снижение содержания основных загрязняющих веществ в сточной воде, взятой из аэротенков при введении в неё штамма микроводорослей *C. vulgaris*, культивированного на разных средах, %
The reduction in the major pollutant content in aerotank wastewaters when inoculated with *C. vulgaris*, cultivated in different media, %

Среда Nutrient medium	Снижение содержания основных загрязняющих веществ, % The reduction in the major pollutant content, %					
	Al	фенол phenol	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ.} N _{tot.}	Fe
Среда Тамия Tamiya's medium	34	35	28	3	5	25
Среда Люка Liuk's medium	34	50	29	19	5	24
Сточная вода Wastewater	62	28	–	–	45	84

Примечание: «–» обозначает отсутствие данных.
Note: “–” indicates the absence of data.

Таблица 4 / Table 4

Количественное содержание элементов в сточной воде в ходе эксперимента
Element contents in wastewater during the experiment

Показатели Parameters	Сточная вода Control wastewater	Сточная вода, инокулированная микроводорослями Inoculated wastewater	Сточная вода после осаждения и удаления клеток микроводорослей Processed wastewater after the harvest
Цветность, градусы Chromaticity, degrees	942	884	560
pH	8,7±0,2	8,9±0,2	8,5±0,2
Концентрация, мг/дм ³ / Concentration, mg/dm ³			
Взвешенные вещества Suspended solids	346±24	484±24	150±14
NH ₄ ⁺	0,7±0,3	0,43±0,17	0,40±0,17
NO ₃ ⁻	1,3±0,4	1,3±0,4	1,1 ±0,3
NO ₂ ⁻	0,023±0,005	0,013±0,006	< 0,001
Cl ⁻	97±13	100±13	45±10
PO ₄ ³⁻	0,13±0,03	1,31±0,24	0,09±0,02
P _{общ.} / P _{tot.}	0,39±0,12	0,61±0,15	0,11±0,04
S _{общ.} / S _{tot.}	128±23	131±24	86±20
N _{общ.} / N _{tot.}	2,1±0,4	2,0±0,4	1,45±0,3
Ca	36±6	86±14	16±3
Mg	8,1±1,2	9,3±1,4	3,2±0,8
K	26±4	30±5	11±2
Na	300±40	320±50	249±34
Fe	0,19±0,05	0,19±0,05	0,12±0,03
Концентрация, мкг/дм ³ / Concentration, µg/dm ³			
Mn	69±17	610±110	65±17
Zn	< 5,0	< 5,0	< 5,0
Cu	0,44±0,18	17±7	2,1±0,9
Pb	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Cd	< 0,20	0,33±0,12	< 0,20
Ni		3,4±1,4	
Co	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cr		2,1±0,5	
B	56±13	50±12	32±10
Ba	22±6	40±10	14±3
Sr	170±30	260±50	98±15
Al	1900±300	1880±280	1670±240
As	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Hg	0,014±0,008	0,029±0,017	0,018±0,009
Фенол / Phenol	69±12	29±5	11±2

2. Показано, что сточная вода АО «Монди СЛПК» может использоваться в качестве питательной среды для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* при масштабировании процесса производства биомассы.

Авторы выражают благодарность экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН за проведение количественного химического анализа.

Работа выполнена при финансировании Государственного задания № 1021051101411-4-

1.6.23 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

References

1. Gordeeva Y.M. Waste management law and policy: global trends and European Union experience // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 237–241. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-237-241
2. The United Nations world water development report 2017. Wastewater: the untapped resource. Paris: UNESCO, 2017. 180 p.
3. Chowdhury S., Mazumder M.A.J., Al-Attas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: occurrences, implications, and future needs in developing countries // Science of the Total Environment. 2016. V. 569–570. P. 476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166
4. Sousa J.C.G., Ribeiro A.R., Barbosa M.O., Pereira M.F.R. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines // Journal of Hazardous Materials. 2018. V. 344. P. 146–162. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.09.058
5. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological treatment of oily wastewater // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209
6. Zhang L., Cheng J., Pei H., Pan J., Jiang L., Hou Q., Han F. Cultivation of microalgae using anaerobically digested effluent from kitchen waste as a nutrient source for biodiesel production // Renewable Energy. 2018. V. 115. P. 276–287. doi: 10.1016/j.renene.2017.08.034
7. Olsson J., Feng X.M., Ascue J., Gentili F.G., Sha-biimam M.A., Nehrenheim E., Thorin E. Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal wastewater treatment // Bioresource Technology. 2014. V. 171. P. 203–210. doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.069
8. Shchemelinina T.N., Patova E.N., Tarabukin D.V., Anchugova E.M., Ocheretenko D.P., Volodin V.V. Wastewater treatment of the timber industry complex using microalgae // Ecology and industry of Russia. 2015. V. 19. No. 7. P. 44–47 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2015-7-44-47
9. Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Gogonin A.V., Tarabukin D.V., Shapenkov D.M. Strain of microalgae *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* V. Andr. for the purification of natural reservoirs and wastewater of industrial enterprises // Patent RU 2703499 C1. Application: 2018120704, 05.06.2018. Date of publication: 17.10.2019. Bull. No. 29 (in Russian).
10. Chinnasamy S., Sood A., Renuka N., Prasanna R., Ratha S.K., Bhaskar S., Rengasamy R., Lewis D.M. Ecobiological aspects of algae cultivation in wastewaters for recycling of nutrients and biofuel applications // Biofuels. 2014. V. 5. P. 141–158. doi: 10.4155/bfs.13.78
11. Renuka N., Sood A., Ratha S.K., Prasanna R., Ahluwalia A.S. Evaluation of microalgal consortia for treatment of primary treated sewage effluent and biomass production // Journal of Applied Phycology. 2013. V. 25. P. 1529–1537. doi: 10.1007/s10811-013-9982-x
12. Mandotra S.K., Kumar P., Suseela M.R., Ramteke P.W. Fresh water green microalga *Scenedesmus abundans*: a potential feedstock for high quality biodiesel production // Bioresource Technology. 2014. V. 156. P. 42–47. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.127
13. Yadavalli R., Rao C.S., Rao R.S., Potumarthi R. Dairy effluent treatment and lipids production by *Chlorella pyrenoidosa* and *Euglena gracilis*: study on open and closed systems // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2014. V. 9. P. 368–373. doi: 10.1002/apj.1805
14. Dutta P., Sahu E., Bhuyan P., Bastia A.K. Analysis of growth and biochemical contents of microalgae grown with wastewater effluent of Emami paper mill, Bala-sore // The Role of Microalgae in Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. P. 153–168. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2_12
15. Ivanovsky V.S., Markin I.V., Shchelkanova E.S., Volodyashkin R.A. Bionanotechnological aspects of wastewater treatment by microalgae // Industrial Ecology. 2021. No. 1 (113). P. 17–21 (in Russian). doi: 10.52190/2073-2589_2021_1_17
16. Feng Y., Li C., Zhang D. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium // Bioresource Technology. 2011. V. 102. P. 101–105. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.016
17. Rajalakshmi A.M., Silambarasan T., Dhanda-pani R. Small scale photo bioreactor treatment of tannery wastewater, heavy metal biosorption and CO₂ sequestration using microalga *Chlorella* sp.: a biodegradation approach // Applied Water Science. 2021. V. 11. P. 1–12. doi: 10.1007/s13201-021-01438-w
18. Kothari R., Pathak V.V., Kumar V., Singh D.P. Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production // Bioresource Technology. 2012. V. 116. P. 466–470. doi: 10.1016/j.biortech.2012.03.121
19. Sinha S., Singh R., Chaurasia A.K., Nigam S. Self-sustainable *Chlorella pyrenoidosa* strain NCIM 2738 based photobioreactor for removal of direct Red-31 dye along with other industrial pollutants to improve the water-quality // Journal of Hazardous Materials. 2015. V. 306. P. 386–394. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.011
20. Eio E.J., Kawai M., Niwa C., Ito M., Yamamoto S., Toda T. Biodegradation of bisphenol A by an algalbacterial system // Environmental Science and Pollution Research. 2015. V. 22. P. 15145–15153. doi: 10.1007/s11356-015-4693-2
21. Kulnev V.V., Pochechun V.A. Experience of algolization of drinking reservoirs of the Nizhny Tagil industrial hub // Interdisciplinary scientific and applied

journal "Biosphere". 2016. V. 8. No. 3. P. 287–290 (in Russian).

22. Pinaev V.E., Kasimov D.V. Reclamation – water bodies and land // Online journal SCIENCE Studies. 2017. V. 9. No. 2. P. 1–9 (in Russian).

23. Gaysina L.A., Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Modern methods of isolation and cultivation of algae. Ufa: Publishing House of BSPU, 2008. 151 p. (in Russian).

24. Mikhajljuk A.V., Shchemelinina T.N., Anchugova E.M. Liuk's nutrient medium for cultivation of microalgae // Patent RU 2556126 C1. Application RU2014100232/10A, 09.01.2014. Date of publication: 10.07.2015. Bull. No. 19 (in Russian).

25. Ministerial Decree No. 552 of 13 December 2016 regarding elaboration and validation of water quality standards for fishery waterbodies, including maximum concentration limits of pollutants in the water [Internet resource] <https://leap.unep.org/countries/ru/national-legislation/>

ministerial-decree-no-552-13-december-2016-regarding-elaboration (Accessed: 12.15.2021).

26. Jena J., Subudhi E. Microalgae: An untapped resource for natural antimicrobials // The Role of Microalgae in Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. P. 99–114. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2_8

27. Sukla L.B., Subudhi E., Pradhan D. The role of microalgae in wastewater treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. 274 p. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2

28. Abdulagatov I.M., Alkhasov A.B., Dogeev G.D., Tumalaev N.R., Aliev R.M., Badavov G.B., Aliev A.M., Salikhova A.S. Microalgae and their technological applications in energy and environmental protection // South of Russia: Ecology, Development. 2018. V. 13. No. 1. P. 166–183 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183

Bacterial consortium as a model for studying the response of the microbial community of the Verkhnekamsk salt mining region to combined pollution

© 2022. L. N. Anan'ina¹ ORCID: 0000-0003-4721-2863*

I. A. Kosheleva² ORCID: 0000-0001-9045-1718*

E. G. Plotnikova¹ ORCID: 0000-0002-0107-0719*

¹Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 13, Goleva St., Perm, Russia, 614081,

²G. K. Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, Federal Research Center "Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences",

5, Prospekt Nauki, Pushchino, Moscow Region, Russia, 142290, e-mail: ludaananyina@mail.ru

The unique ecosystem of industrial development area of the Verkhnekamsk salt deposit (VSD) (Perm krai, Russia) is characterized by the combined effect of salinization and contamination by organic pollutants, including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The purpose of the present study was to examine the degradative potential in relation to naphthalene, as a model PAH, under different salinity of bacterial consortium SMB3, previously isolated from soil of the VSD region, as well as the effect of long-term exposure to high salinity on the taxonomic composition of the consortium. The consortium SMB3 was able to grow on naphthalene both in the presence of NaCl up to 90 g/L, and in its absence. With an increase in the concentration of NaCl to 90 g/L, the growth rate of the consortium decreased by 2.1 times (compared with that of the consortium in a salt-free medium), and the naphthalene utilization estimated after 72 hours of cultivation decreased by 22.9 times. As a result of long-term cultivation in a mineral medium with naphthalene in the presence of 70 g/L NaCl, moderately halophilic strains *Halomonas* sp. SMB31 and *Salinicola socius* SMB35^T, not using naphthalene as the sole source of carbon and energy, and naphthalene degraders *Rhodococcus* spp. SMB37 and SMB38 were shown to preserve in the consortium, while strains *Glutamicibacter* sp. SMB32, *Microbacterium* sp. SMB33, "*Thalassospira permensis*" SMB34^T, not growing on naphthalene, were eliminated. Thus, using the model experiments with the bacterial consortium SMB3, it has been shown that the soil autochthonous microbocenosis in the VSD salt-mining area is able to degrade persistent toxic organic compounds in a wide range of salinity, and prolonged exposure to a high salt concentration leads to a decrease in species richness.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, naphthalene, degradation, salinity, soil.

УДК 57.042+579.222.2

Бактериальный консорциум как модель для изучения реакции микробного сообщества района разработки Верхнекамского месторождения солей на комбинированное загрязнение

© 2022. Л. Н. Ананьина¹, к. б. н., н. с.,

И. А. Кошелева², к. б. н., с. н. с.,

Е. Г. Плотникова¹, д. б. н., в. н. с.,

¹Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 614081, Россия, г. Пермь, ул. Голева, д. 13,

²Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрябина, Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», 142290, Россия, Московская область, г. Пушкино, пр-т Науки, д. 5, e-mail: ludaananyina@mail.ru

Уникальная экосистема района промышленной разработки Верхнекамского месторождения солей (ВМС) (Пермский край, Россия) характеризуется комбинированным действием засоления и загрязнения органическими поллютантами, в том числе полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ). Целью настоящего исследования являлось изучение деградативного потенциала бактериального консорциума SMB3, выделенного ранее из почвы района ВМС, в отношении нафталина, как модельного ПАУ, в условиях разной солёности среды, а также влияния длительного действия высокого засоления на таксономический состав консорциума. Консорциум SMB3 был способен расти на нафталине как в присутствии NaCl в концентрации до 90 г/л, так и в отсутствие соли. С увеличением концентрации NaCl до 90 г/л скорость роста консорциума снижалась в 2,1 раза (по сравнению с таковой при росте консорциума в среде без соли), а утилизация нафталина, оценённая через 72 ч культивирования, уменьшилась в 22,9 раз. Показано, что в результате длительного культивирования в минеральной среде с нафталином в присутствии 70 г/л NaCl в составе консорциума сохранялись умеренно галофильные штаммы *Halomonas* sp. SMB31 и *Salinicola socius* SMB35^T, не использующие нафталин в качестве единственного источника углерода и энергии, и деструкторы нафталина *Rhodococcus* spp. SMB37 и SMB38, а штаммы *Glutamicibacter* sp. SMB32, *Microbacterium* sp. SMB33, «*Thalassospira permensis*» SMB34^T, не растущие на нафталине, элиминировались. Таким образом, на примере модельных экспериментов с бактериальным консорциумом SMB3 показано, что автохтонный микробно-ценоз почвы района солеразработок ВМС обладает способностью к деструкции стойких токсичных органических соединений в широком диапазоне солёности среды, а длительное воздействие высокой концентрации соли приводит к уменьшению видового богатства.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, нафталин, деградация, солёность, почва.

On the territory of the city of Berezniki (Perm krai, Russia) there is a complex of chemical industry enterprises (Azot branch of Uralchem JSC, BSZ JSC, Uralkali PJSC). More than 40% of industrial production in the city belongs to the enterprises of PJSC Uralkali, which are engaged in the extraction and processing of potassium-magnesium salts of the Verkhnekamsk deposit, which is accompanied by the transformation of the natural landscape [1, 2]. A large amount of halite waste, sludge and brine, produced by enterprises, pollutes the environment with compounds of sodium, potassium, magnesium and other elements, and leads to a change in the physicochemical characteristics of biotopes, in particular, their salinization [1, 3]. On the other hand, the raw materials and technological components, used in its processing, serve as a source of pollution of the ecosystem with persistent organic compounds, including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) [4, 5], which are mutagenic and carcinogenic [6, 7].

Thus, anthropogenic transformation of biotopes leads to the formation of new abiotic factors affecting the autochthonous bacterial communities, such as salinity and persistent toxic organic compounds. It is known from the literature that salinization of biotopes of various genesis leads to succession of microbocenoses with a predominance of halotolerant and halophilic microorganisms in them, as well as a significant slowdown in remediation processes [8–12]. Thus, the need to study the degradative potential of soil autochthonous communities in the area of development of the Verkhnekamsk salt deposit (VSD) and their stability under salinity is obvious. The ongoing research in this area will contribute to the development of

new and effective bioremediation strategies for saline soils contaminated with toxic organic compounds. The purpose of the present study was to examine the degradative potential of the consortium SMB3 isolated from the soil of the industrial development area of the VSD [13] in relation to naphthalene as a model PAH under different salinity of the environment, as well as the effect of prolonged exposure to high salinity on the taxonomic composition of the consortium.

Materials and methods

Consortium SMB3 isolated from soil of the Verkhnekamsk salt mining region (Russia) was able to grow on naphthalene (model compound of PAH) under 60 g/L NaCl [13]. The consortium consists of seven strains: SMB31, SMB32, SMB33, SMB34, SMB35, SMB37, and SMB38 [13]. Two strains have been described as type strains of new taxa: *Salinicola socius* SMB35^T [14] and “*Thalassospira permensis*” SMB34^T [15]; taxonomic position at the genus level of strains SMB38, SMB37 on the basis of the analysis of incomplete 16S rRNA gene nucleotide sequences with a length of about 500 bp was defined [16]. As a part of this work, the taxonomic position of the five strains SMB31, SMB32, SMB33, SMB37, and SMB38 based on the determination and analysis of almost complete 16S rRNA gene nucleotide sequences with a length of more than 1200 bp was clarified as described [17, 18]. The 16S rRNA gene nucleotide sequences of strains SMB31, SMB32, SMB33, SMB37, and SMB38 were deposited in the GenBank database at numbers: MH321816, MH327514, MH321886, MH321888, and MH321889, accordingly.

Growth of the bacterial consortium at different NaCl concentrations. Since an increase in bacterial biomass when using naphthalene as the sole source of carbon and energy indicates the ability to metabolize (to degrade) it, accompanied by the inclusion of carbon in newly synthesized cell structures, at the first stage the growth of the consortium in a mineral medium with naphthalene under conditions of different salinity was studied. Consortium SMB3 was precultured in liquid mineral Raymond medium (MRM) [15] containing 60 g/L NaCl with naphthalene (1 g/L) to late exponential growth phase; the conditions corresponded to those for the consortium isolation [13]. Then 1 mL of inoculum was transferred in 99 mL of MRM (without or with NaCl 60, 70, 90 g/L) with naphthalene crystalline powder (1 g/L) in 250 mL bottles. Cultivation was carried out on the thermostable rotary shaker at 100 rpm and 28 °C. The numbers of viable cells within the consortium were determined by the serial dilution method using nutrient Raymond medium (NRM) [15] agar plates with 60 g/L NaCl. The results were expressed as colony-forming units (CFU). Initial CFU value in consortium was approximately 10^5 – 10^6 CFU/mL.

Naphthalene degradation by the consortium at different salinity of the cultivation medium. The biodegradation experiments were carried out in 1.5 mL of MRM using 5 mL Balch tubes with teflon-lined stoppers. Naphthalene was added as a concentrated solution in acetone (stock solution 1.5 g/L) to a final concentration of 0.1 g/L. After that, the vials were kept open for 1 hour to evaporate the acetone. All the experiments were carried out in triplicate on three separate occasions.

Bacterial consortium SMB3 was grown on agarized MRM with 60 g/L NaCl in the vapour phase of naphthalene at 28 °C for 1 week. The biomass was washed off with MRM containing 60 g/L NaCl and transferred into eppendorf tube. Bacterial cells were harvested by centrifugation at 8000 g for 10 min at 28 °C. The biomass washing procedure was repeated 3 times. Next, the biomass was resuspended to a final concentration of approximately 10^6 CFU/mL. One hundred and fifty microliters of this suspension were inoculated into 1.5 mL MRM with NaCl (60 or 90 g/L) or without it. Variant without the addition of bacterial cells served as control. After 72 h of incubation at 28 °C on a rotary shaker at 100 rpm, residual naphthalene was twice extracted from the culture medium with hexane. Naphthalene was determined by gas chromatography-mass spectrometry as was described [19].

Naphthalene utilization by pure cultures. All strains of the consortium were tested for the ability to degrade naphthalene (0.1 g/L) in MRM with 60 g/L NaCl. Because among the bacteria of the consortium, there could be cultures not utilizing naphthalene, the strains were preliminarily grown on agarized NRM with 60 g/L NaCl. Then the experimental scheme described above was followed.

Selection of the consortium at 70 g/L NaCl. In order to study the resistance of the consortium SMB3 to the long-term of high salinity of the medium, 1 mL inoculum of the consortium grown to the late exponential growth phase in liquid MRM with 60 g/L NaCl and naphthalene (1 g/L), was transferred into 99 mL MRM with 70 g/L NaCl and naphthalene (1 g/L). The cultivation was carried out on a thermostable rotary shaker at 100 rpm and a temperature of 28 °C until the late exponential growth phase. In the next five passages, the consortium grown in liquid MRM containing 70 g/L NaCl and naphthalene (1 g/L) served as an inoculum.

The taxonomic composition of the consortium SMB3 selected at 70 g/L NaCl was studied using the denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) method. Total genomic DNA was prepared from bacterial biomass of consortium SMB3 grown on naphthalene in liquid MRM at 70 g/L NaCl (see above). Pure cultures of the consortium: SMB31, SMB32, SMB33, SMB34, SMB35, SMB37, and SMB38 were grown on NRM with 60 g/L NaCl agar plates. DNA was extracted from bacterial biomass according to described SDS-CTAB method [20].

The variable V1–V3 regions of 16S rDNA were amplified and subjected to denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) according to [21]. Electrophoresis was carried out for 4 h at 130 V and 60 °C on a 6% (wt/vol) polyacrylamide gel with a denaturing gradient ranging from 30 to 60% (where 100% denaturant contains 7M urea and 40% formamide) on Dcode™ Universal Mutation System (“Bio-Rad”, USA). After electrophoresis gel was stained in an ethidium bromide solution (0.5 µg/mL) and documented with Gel Doc XR (“Bio-Rad”, USA) system. The bands position in consortium DGGE-profile was compared with those of pure cultures.

Extraction and analysis of osmoprotective compounds. Not all strains of the consortium were able to use naphthalene as a source of carbon and energy, and NRM contains compounds that can be uptaken by cells and used as osmoprotectors; therefore, in the experiment to study synthesized *de novo* osmoprotectors by cells, it

was decided to use glucose as a substrate. The concentration of sodium chloride used in the experiment corresponded to that in the enrichment culture for the isolation of the consortium SMB3. Pure bacterial cultures were grown on glucose (1 g/L) in 100 mL MRM with 60 g/L NaCl on rotary shaking at 28 °C until late exponential growth phase. Ectoine extraction and high performance liquid chromatography using a Separon SGX 100 NH₂, 4.6 × 150 mm, 5 μm (Dr. Maisch, Germany) on a Shimadzu prominence LC-20AD device (Shimadzu Corporation, Japan) equipped with a CPD-20A UV/VIS detector (Shimadzu Corporation, Japan) were carried out according to protocols described in [22].

Statistical data processing. The experiments were carried out in three replicates in three independent experiments. The results were processed using Microsoft Office Excel 2003.

Results and discussion

Growth and naphthalene degradation at different concentrations of NaCl by the consortium SMB3. The consortium SMB3 was capable of growth on naphthalene both in the presence of NaCl up to 90 g/L, and its absence. However, the lag-phase increased from 2 to 11 days and the growth rates of the consortium decreased from $0.103 \pm 0.033 \text{ h}^{-1}$ to $0.048 \pm 0.008 \text{ h}^{-1}$ with increased NaCl concentrations in culture medium (Fig. 1). Study of naphthalene degradation (0.1 g/L) after 72 h of cultivation showed almost complete destruction of the substrate ($87 \pm 6\%$) in a medium without sodium chloride and utilization of about 50% ($47 \pm 13\%$) from the added naphthalene in the presence of 60 g/L NaCl (Fig. 1).

The decrease in the amount of naphthalene in the presence of 90 g/L NaCl was insignificant in relation to the control at $p < 0.05$; this observation can be explained by the fact that the bacteria were in the lag-growth phase – the stage of adaptation to cultivation conditions. However, it should be noted that the bacteria of the consortium were able to use naphthalene as the sole source of carbon and energy in the presence of 90 g/L NaCl, as evidenced by an increase in their number to $9.6 \cdot 10^7 \text{ CFU/mL}$ in the culture medium (Fig. 1).

There are few reports in the literature on pure bacterial cultures or consortia able to efficient growth in presence of 1 g/L of naphthalene [23–26] or almost complete degradation of 0.1 g/L in a few days [27, 28]. Moreover, only one bacterial consortium, able to degrade naph-

thalene in presence of sodium chloride up to 60 g/L [29], and one pure culture *Pseudomonas* sp. LZ-Q, degrading naphthalene within medium salinity limits 75 g/L NaCl, are known [30]. It is known halophilic bacteria and their bacterial consortia utilizing PAH (naphthalene, phenanthrene) at higher concentrations of sodium chloride (up to 250 g/L), but not able to grow in absence of salt in medium [31–33].

Study of the ability to degrade naphthalene by pure strains of the consortium. Phylogenetic analysis of 16S rRNA gene sequences from of all isolates showed their affiliated to the bacterial genera *Salinicola*, and *Thalassospira* [14, 15], *Rhodococcus* [16], *Glutamicibacter*, *Microbacterium* and *Halomonas* (Table). In degradation experiments in presence of 60 g/L NaCl within 72 h reliable naphthalene decrease was shown to occur when using the strains *Rhodococcus* spp. SMB37 and SMB38 (Table). Previously it was established the strains *Rhodococcus* spp. SMB37 and SMB38 can degrade naphthalene without NaCl [16]. The strain *Rhodococcus* sp. SMB38 was shown to be able to grow on naphthalene in the presence of up to 90 g/L NaCl [16]. Thus, salt range of the consortium SMB3 coincided with that of strain-degrader *Rhodococcus* sp. SMB38. The obtained results indicate the leading role of *Rhodococcus* genus bacteria in naphthalene degradation by the consortium SMB3.

The structure of the consortium SMB3 selected in a medium with 70 g/L NaCl. Influence of increasing sodium chloride concentration in culture medium on composition of consortium SMB3 was studied. As increase of sodium chloride concentration from 60 to 90 g/L led to significant decrease of consortium SMB3 growth parameters on naphthalene (Fig. 1), in further experiments we used concentration of 70 g/L NaCl. Five successive passages of consortium SMB3 to MRM with naphthalene and 70 g/L NaCl were performed.

PCR-DGGE analysis of selected consortium SMB3 composition revealed that selection at 70 g/L NaCl had led to elimination of strains “*T. permensis*” SMB34^T, *Glutamicibacter* sp. SMB32, *Microbacterium* sp. SMB33 and preservation of halophilic bacteria *S. socius* SMB35^T and *Halomonas* sp. SMB31, and also naphthalene degrading strains *Rhodococcus* spp. SMB38 and SMB37 (Fig. 2).

It is known that one of the mechanisms of bacterial adaptation to high medium osmolarity is *de novo* synthesis or consumption of low-molecular weight organic compounds from the medium that provides bacteria survival under

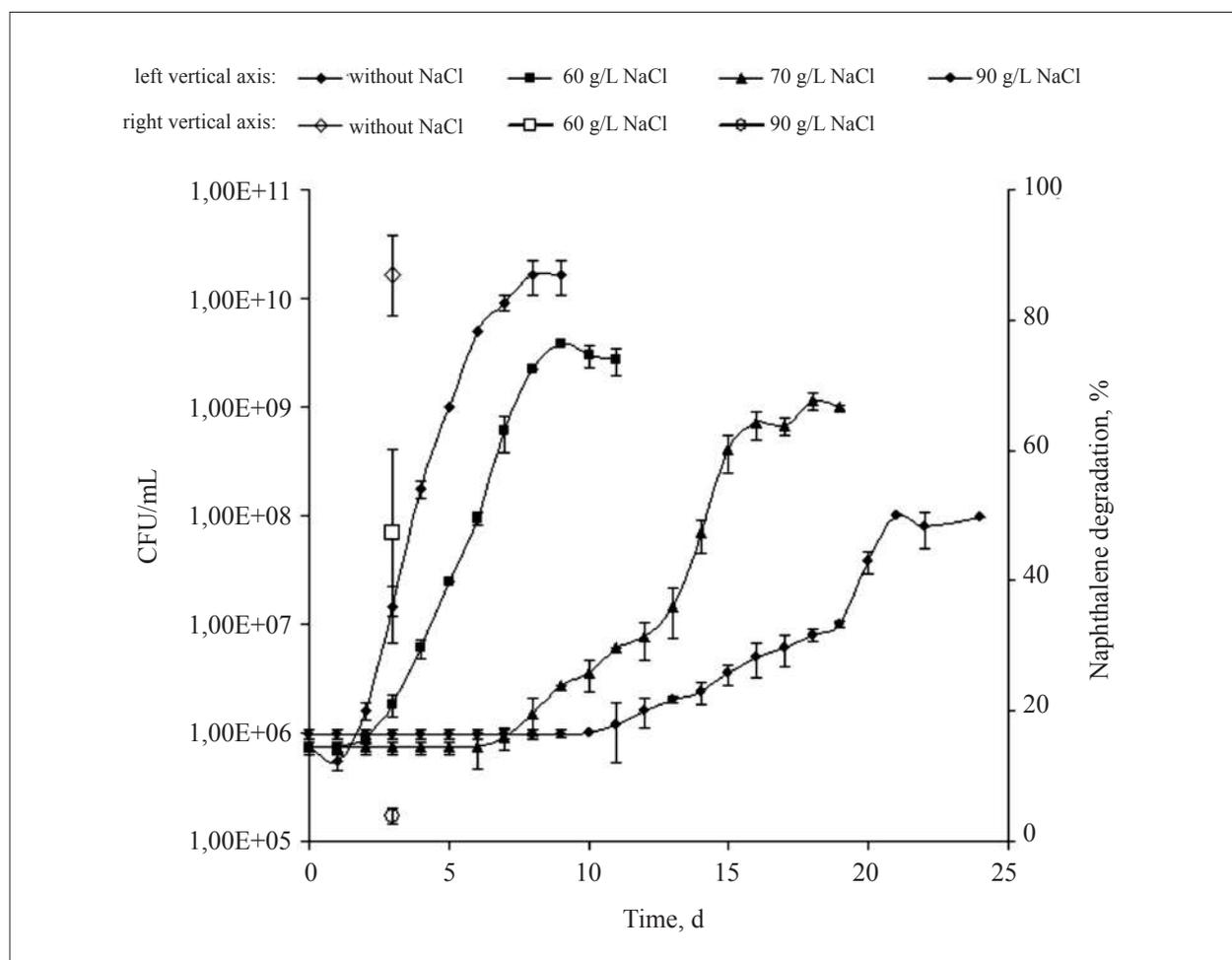


Fig. 1. Growth (closed symbols) of the consortium SMB3 exposed to different NaCl concentrations into liquid MRM and naphthalene degradation (open symbols)

Table

Characterization of strains isolated from the consortium SMB3

Characteristic	SMB31	SMB32	SMB33	SMB34 ^T	SMB35 ^T	SMB37	SMB38
Type strain of most similar valid species (16S rDNA similarity, %)	<i>Halomonas taeanensis</i> BH539 ^T (99.8)	<i>Glutamicibacter halophytocola</i> KLBMP 5180 ^T (99.8)	<i>Microbacterium oxydans</i> DSM 20578 ^T (99.6)	" <i>Talassospira permensis</i> " ^a	<i>Salinicola socius</i> ^b	<i>Rhodococcus artemisiae</i> YIM 65754 ^T (98.8)	<i>Rhodococcus jostii</i> IFO 16295 ^T (99.4)
Residual naphthalene (%) ^c after 72 h of incubation at 60 g/L NaCl	96.0±17.0	91.5±24.8	98.0±15.8	99.1±21.6	93.0±14.4	52.1±16.4 ^d	68.5±8.5 ^d
Intracellular ectoine content (μmol/mg CDW)	0.535±0.018 ^{f,g}	nd	nd	nd	nd	0.075±0.026 ^f	0.088±0.024 ^g

Note: ^a according to [15], ^b according to [14]. ^c Value is given as the mean percentage of residual naphthalene ± sd. ^d Difference between control and experimental variant is reliable under $p < 0.05$. ^{f-g} Difference between experimental variants is reliable under $p < 0.05$. nd – not determined.

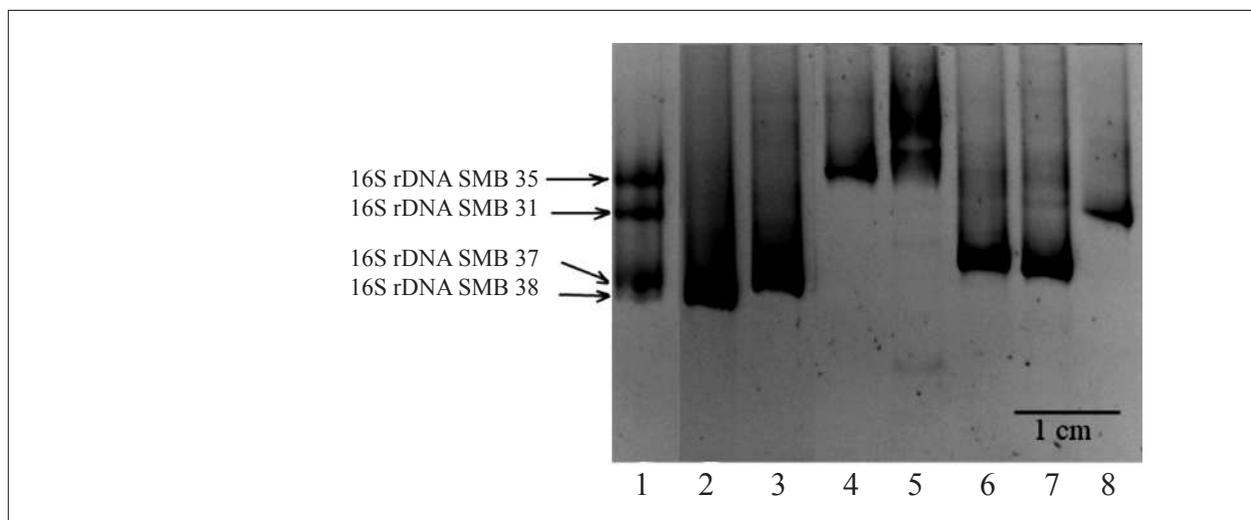


Fig. 2. Denaturing gradient gel electrophoresis of amplified bacterial 16S rDNA gene fragments from genomic DNA of: 1 – the consortium SMB3 exposed to 70 g/L NaCl concentration into liquid MRM with naphthalene, 2 – a strain SMB38, 3 – a strain SMB37, 4 – a strain SMB35, 5 – a strain SMB34, 6 – a strain SMB33, 7 – a strain SMB32, 8 – a strain SMB31. The scale is 1 cm

high salinity [34]. Currently the molecular aspects of osmoadaptation are studied in detail by the example of moderately halophilic bacteria of *Halomonadaceae* family (including strains of species *Halomonas elongata*) for which, as a response to hyperosmotic stress it is typical to synthesize and accumulate in cells predominantly osmoprotector – ectoine in the concentrations from 0.26 to 0.98 $\mu\text{mol}/\text{mg}$ cell dry weight (CDW) [35, 36]. At the same time, the information on the ectoine accumulation by rhodococci cells is rather scarce. Ectoine was detected in cells of *Rhodococcus opacus* strain PD630 under water stress, its content was 34.5 nmol/mg CDW [37]. Our studies on intracellular ectoine content of moderately halophilic strain *Halomonas* sp. SMB31 and halotolerant strains *Rhodococcus* spp. SMB37 and SMB38 are in agreement with previously published data (Table). Under conditions of hyperosmotic stress, the intracellular amount of ectoine of strain-degraders was shown to be approximately 10 times less than in the cells of the moderately halophilic bacterium *Halomonas* sp. SMB31. Based on the above, it could be suggested that moderately halophilic strains of the *Halomonadaceae* family are the source of osmoprotectors for strains-degraders (*Rhodococcus* spp. SMB37, SMB38) improving the viability and maintaining the function under high salinity.

Conclusion

Using the consortium SMB3 as a model system, it was shown that soil autochthonous

bacterial communities of Verkhnekamsk salt mining region have a high degradative potential with respect to the polycyclic aromatic hydrocarbon – naphthalene maintaining it in a wide range of salinity. Meanwhile, salinization of the environment has a negative effect on microbial community, leading to a slowdown in the degradation of naphthalene and a decrease in the species richness. Nevertheless, consortium retains both naphthalene-degrading strains and concomitant halophilic strains possessing mechanisms of salt tolerance due to the synthesis of an osmoprotective solute – ectoine. While halotolerant naphthalene degrading bacteria were noted to accumulate less ectoine. Finally it should be noted that the given work may indicate existence of interactions between moderately halophilic bacteria and bacteria-degraders in the consortium during naphthalene degradation under high salinity, the molecular mechanisms of which require further study. These observations provide hope for the establishment of effective methods for bioremediation as applied in PAH-polluted and saline environments.

The reported study was funded by Ministry of Science and Education of the Perm krai and RFBR No. 17-44-590178 and by state assignment AAAA-A19-119112290008-4.

References

1. Gorbunova K.A., Maksimovich N.G., Andreichuk V.N. Technogenic impact on the geological environment of the Perm krai. Perm, 1990. 44 p. (in Russian).

2. Baboshko A.O., Bachurin B.A. The heavy metals in the wastes from potash production // Mining Information and Analytical Bulletin. 2009. No. 5. P. 369–376 (in Russian).
3. Eremchenko O.Z., Pakhorukov I.V., Shestakov I.E. Development of the solonchak process in the soils of the small rivers valleys of the taiga-forest zone in connection with the production of potassium salts // Eurasian Soil Science. 2020. No. 4. P. 483–494 (in Russian).
4. Bachurin B.A., Odintsova T.A. Mining waste as sources of emission of organic pollutants // Mining Information and Analytical Bulletin. 2009. V. 7. P. 374–380 (in Russian).
5. Odintsova T.A. Genetic differences of bitumoids of salts of the Verkhnekamsky deposit // Georesource Development Strategy and Processes. 2018. V. 16. P. 55–59 (in Russian).
6. Kanaly R.A., Harayama S. Advances in the field of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation by bacteria // Microbial Biotechnology. 2010. V. 3. P. 136–164.
7. Ghosal D., Ghosh S., Dutta T., Ahn Y. Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review // Frontiers in Microbiology. 2016. V. 7. P. 1–27. doi: 10.3389/fmicb.2016.01369
8. Minai-Tehrani D., Minoui S., Herfatmanesh A. Effect of salinity on biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of heavy crude oil in soil // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. V. 82. P. 179–184.
9. Boujelben I., Gomariz M., Martınez-Garcıa M., Santos F., Peca A., Lypez C., Antyn J., Maalej S. Spatial and seasonal prokaryotic community dynamics in ponds of increasing salinity of Sfax solar saltern in Tunisia // Antonie Van Leeuwenhoek. 2012. V. 101. P. 845–857. doi: 10.1007/s10482-012-9701-7
10. Bolhuis H., Fillinger L., Stal L.J. Coastal microbial mat diversity along a natural salinity gradient // PLoS One. 2013. V. 8. Article No. e63166. doi: 10.1371/journal.pone.0063166
11. Qiu G., Ting Y.P. Osmotic membrane bioreactor for wastewater treatment and the effect of salt accumulation on system performance and microbial community dynamics // Bioresource Technology. 2013. V. 150. P. 287–297. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.090
12. Fathepure B.Z. Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments // Frontiers in Microbiology. 2014. V. 5. P. 173.
13. Anan'ina L.N., Altyntseva O.V., Plotnikova E.G. Study of microbial community isolated from the saltern region // Perm University Bulletin. 2005. No. 6. P. 109–114 (in Russian).
14. Anan'ina L.N., Plotnikova E.G., Gavrish E.Y., Demakov V.A., Evtushenko L.I. *Salinicola socius* gen. nov., sp. nov., a moderately halophilic bacterium from a naphthalene-utilizing microbial association // Microbiology. 2007. V. 76. P. 324–330. doi: 10.1134/S0026261707030095
15. Plotnikova E.G., Anan'ina L.N., Krausova V.I., Ariskina E.V., Prisyazhnaya N.V., Lebedev A.T., Demakov V.A., Evtushenko L.I. *Thalassospira permensis* sp. nov., a new terrestrial halotolerant bacterium isolated from a naphthalene-utilizing microbial consortium // Mikrobiologiya. 2011. V. 80. P. 691–699.
16. Anan'ina L.N., Yastrebova O.V., Demakov V.A., Plotnikova E.G. Naphthalene-degrading bacteria of the genus *Rhodococcus* from the Verkhnekamsk salt mining region of Russia // Antonie Van Leeuwenhoek. 2011. V. 100. P. 309–316. doi: 10.1007/s10482-011-9580-3
17. Weisburg W.G., Barns S.M., Pelletier D.A., Lane D.J. 16S Ribosomal DNA amplification for phylogenetic study // Journal of Bacteriology. 1991. V. 173. P. 697–703. doi: 10.1128/jb.173.2.697-703.1991
18. Zhou J., Fries M.R., Chee-Sanford J.C., Tiedje J.M. Phylogenetic analyses of a new group of denitrifiers capable of anaerobic growth on toluene and description of *Azoarcus tolulyticus* sp. nov // International Journal of Systematic Bacteriology. 1995. V. 45. P. 500–506. doi: 10.1099/00207713-45-3-500
19. Daane L.L., Harjono I., Zylstra G.J., Haggblom M.M. Isolation and characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria associated with the rhizosphere of salt marsh plants // Applied and Environmental Microbiology. 2001. V. 67. P. 2683–2691. doi: 10.1128/AEM.67.6.2683-2691.2001
20. Wilson K. Preparation of genomic DNA from bacteria // Current protocols in molecular biology / Eds. F.M. Ausubel, R. Brent, R.E. Kingston, D.D. Moore, J.G. Seidman, J.A. Smith, K. Struhl. John Wiley and Sons, 1995. P. 2–11.
21. Tiirola M.A., Mannisto M.K., Puhakka J.A., Kulo-maa M.S. Isolation and characterization of *Novosphingobium* sp. strain MT1, a dominant polychlorophenol-degrading strain in a groundwater bioremediation system // Applied and Environmental Microbiology. 2002. V. 68. P. 173–180. doi: 10.1128/aem.68.1.173-180.2002
22. Schubert T., Maskow T., Benndorf D., Harms H., Breuer U. Continuous synthesis and excretion of the compatible solute ectoine by a transgenic, nonhalophilic bacterium // Applied and Environmental Microbiology. 2007. V. 73. P. 3343–3347.
23. Wang B., Lai Q., Cui Z., Tan T., Shao Z. A pyrene-degrading consortium from deep-sea sediment of the West Pacific and its key member *Cycloclasticus* sp. P1 // Environmental Microbiology. 2008. V. 10. P. 1948–1963. doi: 10.1111/j.1462-2920.2008.01611.x
24. Pathak H., Kantharia D., Malpani A., Madamwar D. Naphthalene degradation by *Pseudomonas* sp. HOB1: in vitro studies and assessment of naphthalene degradation efficiency in simulated microcosms // Journal of Hazardous Materials. 2009. V. 30. P. 1466–1473. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.074
25. Patel V., Siddharth J., Datta M. Naphthalene degradation by bacterial consortium (DV-AL) developed

from Alang-Sosiya ship breaking yard, Gujarat, India // *Bioresource Technology*. 2012. V. 107. P. 122–130. doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.056

26. Cai Z., Shi S., Li S., Zhang W., Cai J., Yang G., Zhu X. Isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. nai8 capable of naphthalene degradation // *Asian Journal of Chemistry*. 2013. V. 26. No. 1. P. 164–168. doi: 10.14233/ajchem.2014.15365

27. Nwinyi O.C., Picardal F.W., An T.T., Amund O.O. Aerobic degradation of naphthalene, fluoranthene, pyrene and chrysene using indigenous strains of bacteria isolated from a former industrial site. V. 7. British Columbia: SENRA Academic Publishers, 2013. P. 2303–2314.

28. Xu P., Ma W., Han H., Hou B., Jia S. Characterization of naphthalene degradation by *Streptomyces* sp. QWE-5 isolated from active sludge // *Water Science and Technology*. 2014. V. 70. P. 1129–1134. doi: 10.2166/wst.2014.356

29. Arulazhagan P., Vasudevan N., Yeom I.T. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbon by a halotolerant bacterial consortium isolated from marine environment // *International Journal of Environmental Science and Technology Abbreviation*. 2010. V. 7. P. 639–652.

30. Jiang Y., Huangm H., Wu M., Yu X., Chen Y., Liu P., Li X. *Pseudomonas* sp. LZ-Q continuously degrades phenanthrene under hypersaline and hyperalkaline condition in a membrane bioreactor system // *Biochemistry and Biophysics Reports*. 2015. V. 1. P. 156–167. doi: 10.1007/s41048-016-0018-3

31. Zhao B., Wang H., Mao X., Li R. Biodegradation of phenanthrene by a halophilic bacterial consortium under aerobic conditions // *Current Microbiology*. 2009. V. 58. P. 205–210. doi: 10.1007/s00284-008-9309-3

32. Al-Mailem D.M., Sorkhoh N.A., Al-Awadhi H., Eliyas M., Radwa S.S. Biodegradation of crude oil and pure hydrocarbons by extreme halophilic archaea from hypersaline coasts of the Arabian Gulf // *Extremophiles*. 2010. V. 14. P. 321–328. doi: 10.1007/s00792-010-0312-9

33. Khemili-Talbi S., Kebbouche-Gana S., Akmuoussi-Toumi S., Angar Y., Gana M.L. Isolation of an extremely halophilic arhaeon *Natrialba* sp. C21 able to degrade aromatic compounds and to produce stable biosurfactant at high salinity // *Extremophiles*. 2015. V. 19. P. 1109–1120. doi: 10.1007/s00792-015-0783-9

34. Roberts M.F. Organic compatible solutes of halotolerant and halophilic microorganisms // *Saline Systems*. 2005. V. 4. P. 1–30. doi: 10.1186/1746-1448-1-5

35. Wohlfarth A., Severin J., Galinski E.A. The spectrum of compatible solutes in heterotrophic halophilic eubacteria of the family *Halomonadaceae* // *The Journal of General Microbiology*. 1990. V. 136. V. 705–712.

36. Guzman H., Van-Thuoc D., Martin J., Hatti-Kaul R., Quillaguaman J. A process for the production of ectoine and poly(3-hydroxybutyrate) by *Halomonas boliviensis* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2009. V. 84. P. 1069–1077. doi: 10.1007/s00253-009-2036-2

37. Alvarez H.M., Silva R.A., Cesari A.C., Zamit A.L., Peressutti S.R., Reichelt R., Keller U., Malkus U., Rasch C., Maskow T., Mayer F., Steinbchel A. Physiological and morphological responses of the soil bacterium *Rhodococcus opacus* strain PD630 to water stress // *FEMS Microbiology Ecology*. 2004. V. 50. P. 75–86. doi: 10.1016/j.femsec.2004.06.002

Особенности распределения *Xanthogaleruca luteola* (Coleoptera: Chrysomelidae) в защитных насаждениях Нижнего Поволжья

© 2022. О. С. Филимонова, аспирант,
М. Н. Белицкая, д. б. н., профессор, г. н. с.,
И. Р. Грибуст, к. с.-х. н., с. н. с.,
Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук,
400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97,
e-mail: olga_filimonova_88@rambler.ru

Представлены данные об особенностях экологии хозяйственно опасного вредителя – ильмового листоеда *Xanthogaleruca luteola* Müller, 1766 (Coleoptera: Chrysomelidae). Листоед повреждает исключительно древесные растения рода *Ulmus* L. В условиях Нижнего Поволжья наиболее уязвим *U. glabra*, в кроне которого уровень дефолиации достигает 93%. Вредитель предпочитает заселять нижний ярус кроны деревьев, где фиксируется максимальная плотность популяции. Установлено, что в период засухи происходит резкое повышение численности листоеда вследствие ослабления деревьев. Регулирующим фактором, сдерживающим рост численности листоеда, является обострение внутривидовых отношений, что влечёт снижение потенциала размножения. Так, число яиц в кладках после выхода самок из диапаузы колеблется на уровне 21–23 шт. При восстановлении численности вредителя число яиц в кладках II генерации снижается на 22,1%. Выявлено, что число кладок и яиц в кладке значительно варьирует от вида вяза. Таким образом, способность к динамическому равновесию в изменяющихся условиях среды свидетельствует о стабильности популяции листоеда и его успешной адаптации к условиям Нижнего Поволжья.

Ключевые слова: филлофаги, *Xanthogaleruca luteola*, *Ulmus*, Нижнее Поволжье.

Distribution features of *Xanthogaleruca luteola* (Coleoptera: Chrysomelidae) in the protective plantings of the Lower Volga

© 2022. O. S. Filimonova ^{ORCID: 0000-0002-8716-0140}
M. N. Belitskaya ^{ORCID: 0000-0001-7853-940X}, I. R. Gribust ^{ORCID: 0000-0002-7544-674X}
Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Meliorations
and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences,
97, Prospekt Universitetskiy, Volgograd, Russia, 400062,
e-mail: olga_filimonova_88@rambler.ru

Presented data on the features of ecology of economically dangerous pest – *Xanthogaleruca luteola* Müller, 1766 (Coleoptera: Chrysomelidae). The development of leaf beetle occurs exclusively on woody plants of the *Ulmus* L. ancestral complex, which account for about 80% of the total composition of dendroflora in the Lower Volga. In the conditions of the study region, phyllophage is recorded on *U. glabra*, *U. pumila*, *U. laevis*. The greatest degree of foliage damage is noted for hornbeam elm, in the crown of which the defoliation level reaches 93%. This species prefers to populate the lower tier of the crown of trees, where illumination is no more than 1500 lux, the maximum density of leaf food is recorded (more than 40 individuals per 100 leaves). The quantitative abundance of the pest is subject to significant fluctuations under the influence of weather conditions. During the drought period, there is a sharp hanging of the population density due to the weakening of trees. The regulatory factor limiting the growth of leaf beetle is the aggravation of intraspecific relations with an increase in population density, which entails a decrease in the potential for reproduction. So, the number of eggs in the clutches of females after leaving the diapause fluctuates at the level of 21–23 pieces. When the pest is restored, the number of eggs in the clutches of the II generation decreases by 22.1%. It was revealed that the number of clutches and eggs in the clutch varies significantly from a species of woody plant. The Imago mainly lays eggs in the crown of *U. labra*, while the number of eggs in the clutch is minimal. The established differences are obviously related to the preference of hornbeam elm as a fodder plant, which entails an increase in population density and the number of masonry on the leaves in the crown of this type of elm. The decrease in the number of eggs in the clutch is due to the development of stress in females with a high frequency of contacts between individuals. Thus, the presence of mechanisms for regulating the abundance of ilm leaf beetle indicates the successful adaptation of the pest to the conditions of the Lower Volga.

Keywords: phyllophages, *Xanthogaleruca luteola*, *Ulmus*, Lower Volga.

В малолесных регионах при создании защитных насаждений широко используются древесные растения родового комплекса *Ulmus* L., отличающиеся высокой экологической пластичностью. На их долю в Нижнем Поволжье приходится около 80% всего состава дендрофлоры [1]. В настоящее время посадки вязов характеризуются наличием большого числа деревьев неудовлетворительного санитарного состояния в результате влияния различных стрессовых факторов [2]. Одной из причин угнетения и ранней гибели деревьев является высокая поврежденность их ассимиляционного аппарата филлофагами [3]. В комплексе вредителей, питающихся листвой, деструктивная деятельность наиболее выражена у листогрызущих насекомых. Типичными и постоянными обитателями кроны вязов являются: зимняя пяденица *Operophtera brumata* Linnaeus, 1758 [4], непарный шелкопряд *Lymantria dispar* Linnaeus, 1758 [5], ильмовый ногохвост *Dicranura ulmi* Denis & Schiffermuller, 1775 [6]. Среди листогрызущих филлофагов выделяется хозяйственно опасный вредитель – ильмовый листоед *Xanthogaleruca luteola* Müller, 1766 (Coleoptera: Chrysomelidae), ареал обитания которого охватывает всю Голарктику [7, 8].

В условиях аридной зоны листоед способен формировать хронические очаги массового размножения [9]. На территории Нижнего Поволжья вредитель в массовом количестве впервые был зафиксирован в 1956 г. [10]. В последующем регулярно фиксировались вспышки массового размножения вредителя. В настоящее время в посадках с участием вязов отмечается подъём численности вредителя с образованием очагов площадью от 225 до 6400 га. В ряде случаев деятельность филлофага приводит к высокой степени дефолиации кроны деревьев [9]. Вредоносность *X. luteola* усиливается его способностью развиваться в условиях аридной зоны в двух-трёх генерациях за вегетационный сезон, что отрицательно сказывается на фотосинтезирующей функции листьев [11, 12].

Изучение специфики жизнедеятельности листоеда имеет важное значение при изучении вопросов повышения устойчивости и функциональной роли защитных насаждений в экстремальных условиях Нижнего Поволжья.

Цель настоящего исследования – изучение экологических особенностей и пространственного распределения *X. luteola* в насаждениях засушливой зоны Нижнего Поволжья.

Материалы и методика исследования

Исследования проводили в период 2017–2020 гг. в дендрологических коллекциях и защитных лесных насаждениях ФНЦ агроэкологии РАН (ФГУП «Волгоградское» кадастровый № 34:34:000000:122; Землепользование «Качалинское» кадастровый № 34:08:000000:6; «Нижневолжская станция по селекции древесных пород» кадастровый № 34:36:0000:14:0178), а также в рекреационно-озеленительных насаждениях г. Волгограда.

В насаждениях разных экологических категорий выделяли по три постоянных пробных площадки (ППП) площадью 0,1 га (20 × 50 м), различающихся по степени рекреационной нагрузки и уровню загрязнения среды. На каждой ППП отбирали модельные деревья таких видов, как вяз приземистый (*U. pumila*), вяз шершавый (*U. glabra*) и вяз гладкий или обыкновенный (*U. laevis*).

Сбор материала проводили при детальном обследовании насаждений с использованием метода энтомологического кошения, визуального учёта и ручного сбора вредителя. Учёт численности преимагинальных стадий выполняли путём подсчёта особей на трёх модельных ветвях длиной 1,0 м из верхней, средней и нижней частей кроны модельных деревьев. Сборы проводили в период с мая по сентябрь каждые 10–14 дней с 10:00 до 12:00 ч при облачности не более 4 баллов и умеренном ветре.

Поврежденность кроны деревьев оценивали по двум параметрам: экстенсивность (доля повреждённых листьев независимо от степени повреждения) и интенсивность (доля площади изъятия листовой пластинки только у повреждённых листьев) [13].

В каждой категории насаждений проводили измерения влажности и температуры воздуха с помощью прибора AR 1837, а также освещённости кроны с помощью люксметра PeakTech 5025. Статистический анализ полученных данных проводили с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics и Microsoft Excel [14]. В таблицах указаны средние арифметические значения ± стандартные ошибки средних.

Результаты и обсуждение

В условиях Нижнего Поволжья *X. luteola* практически единственный вредитель, приводящий к полной дефолиации листвы в кронах деревьев. Вязы повреждают как имаго, так и личинки листоеда. Повреждения, наносимые



Рис. 1. Повреждённость вяза приземистого ильмовым листоедом
 Fig. 1. Damage of *Ulmus pumila* the *Xanthogaleruca luteola*

Таблица 1 / Table 1

Повреждённость кроны *Ulmus* личинками ильмового листоеда
 Damage to the crown of *Ulmus* by the larvae of the *Xanthogaleruca luteola*

Вид <i>Ulmus</i> Species of <i>Ulmus</i>	Численность личинок, шт./100 листьев The number of larvae, pieces/100 leaves	Повреждённость кроны, % Damage to the crown, %	
		экстенсивность extensiveness	интенсивность intensity
<i>U. glabra</i>	62,5±5,9	93,0	46,0
<i>U. pumila</i>	30,3±2,3	79,0	36,0
<i>U. laevis</i>	20,1±1,1	76,0	12,0

Таблица 2 / Table 2

Распределение *Xanthogaleruca luteola* в кронах древесных растений рода *Ulmus*
 в зависимости от освещённости / Distribution of *Xanthogaleruca luteola* in the crowns
 of woody plants of the genus *Ulmus* depending on illumination

Ярус кроны Crown tier	Освещённость, лк Illumination, lx	Численность, шт./100 листьев Number, pieces/100 leaves
Верхний / Top	5160±360	18,0±1,7
Средний / Average	3250±210	22,4±2,2
Нижний / Lower	1350±100	38,1±3,0

жуками, незначительны. Они выгрызают лишь по 2–3 небольших отверстия на листе диаметром до 5 мм, экстенсивность повреждений при этом не превышает 20%. Личинки же скелетируют листовую пластинку с нижней стороны, что обуславливает усыхание и гибель листа. Ущерб от деятельности личинок может достигать 100% (рис. 1).

Наши наблюдения свидетельствуют, что в насаждениях листоед осваивает разные древесные виды *Ulmus*, их заселение филлофагом происходит неоднородно (табл. 1). В большей степени *X. luteola* заселяет вяз шершавый *U. glabra*. В кроне данного вида вяза зафиксировано максимальное значение плотности личинок вредителя – 106 особей/100 листьев.

На других видах ильмовых, произрастающих на территории Нижнего Поволжья, численность вредителя значительно ниже: в 2,1 и 3,1 раза на вязах приземистом *U. pumila* и обыкновенном *U. laevis* соответственно.

Сокращение численного обилия личинок в кронах *U. pumila* и *U. laevis* слабо лимитирует уровень повреждённости листвы. Значение экстенсивности для этих видов вязов составляет 79 и 76% соответственно. Вместе с тем снижение интенсивности влияния филлофага здесь менее выражено. Если для консорции *U. pumila* этот показатель незначительно изменяется от аналогичного для *U. glabra* (на 10%), то в случае воздействия ильмового

листоеда на *U. laevis* интенсивность повреждённости листвы снижается на 26,1%.

Экологическая пластичность *X. luteola* определяет также и его локализацию в вертикальном градиенте кроны. Основным фактором, влияющим на размещение личинок вредителя, является уровень освещённости (табл. 2).

Установлено, что наиболее предпочтительными к заселению листоедом становятся затенённые участки кроны, где освещённость не превышает 1500 лк. Данной закономерности в полной мере соответствует нижний ярус кроны деревьев: здесь на 100 листьев приходится до 40 личинок. С продвижением вверх по градиенту ярусности в кроне отмечается усиление интенсивности светового потока, что становится лимитирующим фактором для жизнедеятельности филлофага. На листе среднего и верхнего ярусов число питающихся личинок в 1,7 и 2,1 раза ниже такового в сравнении с нижним ярусом кроны.

Анализ локализации вредителя внутри кроны выявил следующее: личинки локализуются преимущественно по периферии кроны, где их численность составляет в среднем $32,8 \pm 1,5$ шт./100 листьев, а степень повреждённости листвы достигает критического значения – 95%. Во внутрикрупном пространстве число личинок сокращается на 42,7%, а повреждение листвы не превышает 50%.

К модифицирующим факторам, определяющим количественное обилие листоеда, также относятся основные метеорологические показатели (температура и влажность воздуха). В течение вегетационного периода отмечается косвенное влияние погодных условий на плотность популяции вредителя через состояние насаждений (табл. 3).

Так, в период засушливого и жаркого лета 2018 г. происходило физиологическое ослабление и снижение сопротивляемости растений, что провоцировало резкое повышение

численности листоеда. При этом плотность популяции вредителя в среднем составляла 22–25 особей/100 листьев. В более влажные годы количественное обилие листоеда было ниже.

Xantogaleruca luteola характеризуется многолетним типом популяционной динамики, полный цикл которой составляет примерно 8 лет, поэтому при благоприятных погодных условиях (прежде всего, засуха) в период с 2025 по 2027 гг. следует ожидать подъём численности вредителя по типу вспышки.

Погодные условия могут оказывать также прямое воздействие на листоеда, снижая его численность. В зимний период под действием низких температур происходит гибель большого числа имаго – зимующей стадии *X. luteola*. После выхода из диапаузы при низкой численности вредителя закономерно восстановление плотности популяции, что приводит к повышению плодовитости самок.

Отмечено, что потенциал размножения после зимовки у самок выше, чем у особей летнего периода. Так, количество яиц в кладках первой генерации на 28,5% больше, чем в яйцекладках второй генерации (рис. 2).

Уменьшение числа яиц в кладках второй генерации объясняется снижением роста численности популяции при высокой плотности особей. При этом повышенная частота контактов между особями ведёт к развитию стрессового состояния и снижению плодовитости самок.

Количество кладок в период развития второго поколения возрастает более чем в 4 раза по сравнению с первой генерацией (рис. 2), что обусловлено высокой плотностью имаго в кроне деревьев.

Установлено, что листоед предпочитает откладывать яйца в кроне *U. glabra* (табл. 4). Здесь число кладок в среднем составляет 11–15 шт./100 листьев, максимально зарегистрировано 40 яйцекладок на единицу учёта. Количество яйцекладок в кронах *U. pumila*

Таблица 3 / Table 3
Динамика плотности ильмового листоеда в условиях Волгоградской области
Density dynamics of *Xantogaleruca luteola* in the Volgograd region

Год наблюдений Year of observation	Влажность воздуха, % Air humidity, %	Среднесуточная температура, °C Average daily temperature, °C	Плотность популяции, шт./100 листьев Population density, pieces/100 leaves
2017	59,0	25,4±0,4	13,5±0,6
2018	46,9	25,0±0,4	23,4±1,2
2019	52,3	23,3±0,4	19,8±1,0
2020	56,1	23,8±0,3	единично / singly

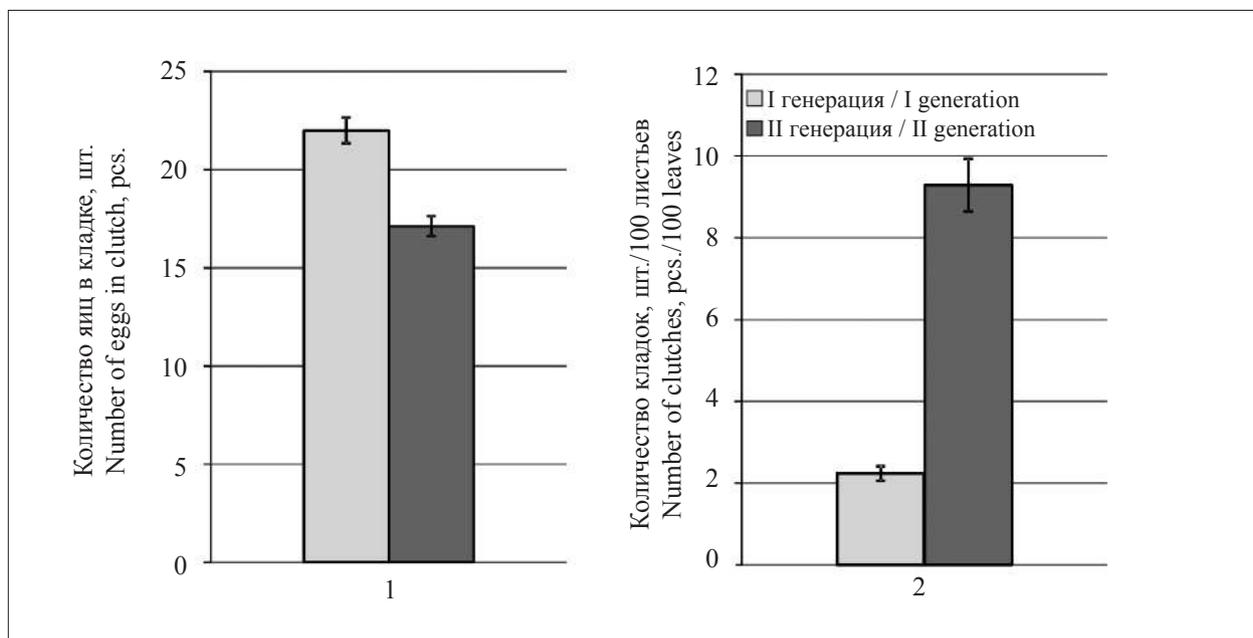


Рис. 2. Изменение числа яиц в кладках (1) и обилия кладок (2) ильмового листоеда
Fig. 2. Change in the number of eggs in clutches (1) and the abundance of clutches (2) of the *Xanthogaleruca luteola*

Таблица 4 / Table 4

Распределение кладок ильмового листоеда в кронах древесных растений рода *Ulmus*
 Distribution of clutches of *Xanthogaleruca luteola* in the crowns of woody plants of the genus *Ulmus*

Вид <i>Ulmus</i> Species of <i>Ulmus</i>	Число кладок, шт./100 листьев Number of clutches, pieces/100 leaves	Число яиц в кладке, шт. Number of eggs in a clutch, pieces
<i>U. glabra</i>	13,0±1,2	11,9±0,4
<i>U. pumila</i>	9,0±0,7	14,1±0,4
<i>U. laevis</i>	7,7±0,6	13,2±0,4

и *U. laevis* снижается на 30,7 и 40,9% соответственно.

Очевидно, низкое число кладок в кроне вяза гладкого связано с репеллентными свойствами тканей листа данного вида. Это объясняет также низкую повреждённость ассимиляционного аппарата *U. laevis* и минимальную плотность вредителя в кроне. В то же время высокая плотность вредителя в кроне вяза шершавого вызывает снижение фертильности самок и приводит к снижению числа яиц в кладке. Так, минимальное число яиц в кладке фиксируется в кроне *U. glabra*, причём для вяза гладкого при низкой плотности листоеда этот показатель на 10,9% выше.

Заклучение

Выявлены экологические особенности *X. luteola* в условиях засушливой зоны Нижнего Поволжья и особенности дефолиации адаптированных видов вяза: доля повреждённых листьев в кроне дерева достигает 93–95%.

В спектре используемых в защитном лесоразведении и озеленении древесных видов большей устойчивостью к вредителю отличается вяз гладкий *U. laevis*. Число питающихся особей в кронах вяза шершавого *U. glabra* на 50% выше, чем на листе других видов вяза.

При размещении в вертикальном градиенте кроны важное значение имеет освещённость – вредитель локализуется на затенённых участках (нижняя часть) кроны, в горизонтальном – заселяет периферийные участки кроны, игнорируя приствольное пространство.

Пространственное размещение *X. luteola* обусловлено действием абиотических факторов. Так, низкая влажность и высокая температура воздуха в летний период способствуют повышению плотности популяции листоеда, тогда как в годы с влажным летом количественное обилие вредителя снижается. В зимний период с устойчивыми морозами значительная часть зимующих жуков погибает. Однако плодовитость перезимовавших самок заметно

возрастает. Это способствует развитию стрессового состояния и снижению численности популяции.

В период засухи 2018 г. наблюдался максимум плотности популяции листоеда, в 2020 г. зафиксирована депопуляция – филлофаг в кронах деревьев присутствовал единично. При благоприятных условиях для размножения следующий пик численности вредителя следует ожидать в период с 2025 по 2027 гг. Такие показатели, как плотность яйцекладок и число яиц в кладке, являются не стабильными и подвержены сезонной динамике.

Результаты данных исследований могут использоваться при лесопатологическом мониторинге и прогнозировании энтомологической ситуации в насаждениях, а также при разработке рекомендаций по оптимизации санитарного состояния лесопосадок.

References

1. Podkovyrov I.Yu. Scientific basis for the selection of species and form development of *Ulmus* L. for protective forest plantations of the Lower Volga region // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2014. No. 3 (35). P. 91–97 (in Russian).
2. Semenyutina A.V., Noyanova N.G. Regional specificity of greening of small towns in the southern dry steppe zone // *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*. 2019. No. 6. P. 146–159 (in Russian).
3. Ponomarev V.I., Klobukov G.I., Napalkova V.V. Effect of defoliation of woodlands during mass reproduction outbreak of unpaired silkworm (*Lymantria dispar* (L.)) on their sanitary state at the northern border of the phyllophage range // *Principy ekologii*. 2019. No. 1. P. 63–71 (in Russian).
4. Rubcov V.V., Utkina I.A. Features of the last outbreak of mass reproduction of the winter moth in the southern forest-steppe // *Lesnoy vestnik*. 2014. No. 6. P. 86–93 (in Russian).
5. Simonenkova V.A. Analysis of the occurrence and development of outbreaks of mass reproduction of the main leaf-eating pests // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011. No. 2 (30). P. 242–244 (in Russian).
6. Seryy G.A. Mass breeding and phenological features of the elm springtail in the Volgograd region // *Bioraznoobrazie aridnyh ekosistem*. Moskva: Planeta, 2014. P. 63–72 (in Russian).
7. Lawson A., Dahlsten D. Implementation of a city-wide monitoring program to base treatment decisions on elm leaf beetle abundance // *Journal of Arboriculture*. 2003. V. 29. P. 34–41.
8. Rebwar A.M. Biology of elm leaf beetles *Xanthogaleruca luteola* (Coleoptera: Chrysomelidae) in Kurdistan Region-Iraq // *Journal of Biodiversity and Endangered Species*. 2020. V. 8. No. 1. P. 1–3. doi: 10.24105/2332-2543.2020.8.238
9. Seryy G.A. Current state of mass reproduction of the elm leaf beetle in the south of Russia // *Issledovaniya prirodnogo kompleksa okrestnostej ozera Baskunchak*. Volgograd: Volgogradskoe nauchnoe izdatel'stvo, 2013. P. 121–125 (in Russian).
10. Polivanova E.N., Stebaev N.V. Features of damage to elm rocks by birch bark beetle and elm springtail in the vicinity of Stalingrad // *Uchyonye zapiski Moskovskogo universiteta*. 1959. V. 189. P. 148–160 (in Russian).
11. Myrkasimova A.S. Elm leaf beetle *Xanthogaleruca (Galerucella) luteola* of elms of the city of Almaty // *European journal of biomedical and life sciences*. 2016. No. 4. P. 3–6 (in Russian). doi: 10.20534/ELBLS-16-4-4-6
12. Temirkul K.K., Bikirov S. Mass damage of elm trees by elm leaf beetle (*Galerucella luteola* Mull.) in Bishkek // *Colloquium-journal*. 2019. No. 28–4. P. 19–21 (in Russian).
13. Bel'skaya E.A., Vorobejchik E.L. Reaction of aspen phyllophages to emissions from the Central Urals copper smelter // *Ekologiya*. 2013. No. 2. P. 99–109 (in Russian).
14. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. Multivariate statistical analysis of ecological communities (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 5–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2019-1-005-011

Микросателлитный анализ популяций уссурийского пятнистого оленя, акклиматизированного в европейской части России

© 2022. А. П. Каледин¹, д. б. н., профессор, С. В. Бекетов², д. б. н., в. н. с.,
 Д. В. Жуков³, начальник отделения, В. И. Фертиков³, д. б. н., г. н. с.,
 В. М. Макеева⁴, д. б. н., в. н. с., А. В. Смуров⁴, д. б. н., директор музея,
 А. М. Остапчук¹, к. б. н., зав. сектором, Е. А. Коноров², к. б. н., с. н. с.,
 Ю. А. Столповский², д. б. н., заместитель директора,

¹Российский государственный аграрный университет –
 МСХА им. К. А. Тимирязева,

127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49,

²Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН,

119991, Россия, ГСП-1, г. Москва, ул. Губкина, д. 3,

³ГК «Завидово» ФСО РФ,

171274, Россия, Тверская область, Конаковский район, пгт Козлово, д. 10,

⁴Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,

e-mail: svbeketov@gmail.com

Впервые проведён микросателлитный анализ двух популяций пятнистого оленя (*Cervus nippon hortulorum*), акклиматизированного в европейской части Российской Федерации – Тверской (Госкомплекс «Завидово») и Калужской (Госкомплекс «Таруса») областях. Рассчитанные по 12 локусам показатели *F*-статистики указывают на недостаток гетерозиготных генотипов и свидетельствуют о слабой дивергенции популяций. В межпопуляционном сравнении большим аллельным разнообразием и значительным количеством приват-аллелей отличалась тверская популяция. Генетическая изменчивость по наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности для завидовской популяции составила $H_o = 0,47 \pm 0,08$ и $H_E = 0,51 \pm 0,09$ и для тарусской – $H_o = 0,52 \pm 0,09$ и $H_E = 0,49 \pm 0,08$ соответственно. При этом обе изучаемые популяции пятнистых оленей характеризовались снижением аллельного разнообразия и гетерозиготности относительно «материнской» аборигенной дальневосточной популяции. Соответственно, на современном этапе управления охотничьими ресурсами обоснованное искусственное расширение ареала редких и особенно ценных в хозяйственном отношении видов животных за счёт их расселения и акклиматизации невозможно без проведения генетического анализа популяций с использованием высоко полиморфных молекулярных маркеров и применения стандартных оценочных показателей динамических процессов в популяциях. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что генетическое разнообразие исследованных акклиматизированных популяций пятнистого оленя Тверской и Калужской областей достоверно не отличается. При этом различие в количестве приватных аллелей предполагает независимое развитие генофондов популяций, а резкое сокращение аллельного разнообразия (в три раза) исследованных популяций по сравнению с «материнской» Приморской популяцией показывает, что они нуждаются в проведении мероприятий по «оздоровлению» их генофонда с целью увеличения жизнеспособности.

Ключевые слова: пятнистый олень, популяция, интродукция, акклиматизация, микросателлиты, аллельная изменчивость, генетическая дивергенция.

Microsatellite analysis of populations of the ussuri sika deer acclimatized in the European part of Russia

© 2022. A. P. Kaledin¹ ORCID: 0000-0002-1769-5043, S. V. Beketov² ORCID: 0000-0001-7947-8688,
 D. V. Zhukov³ ORCID: 0000-0002-0729-5732, V. I. Fertikov³ ORCID: 0000-0002-0729-5732,
 V. M. Makeeva⁴ ORCID: 0000-0002-4360-5371, A. V. Smurov⁴ ORCID: 0000-0001-5143-1634,
 A. M. Ostapchuk¹ ORCID: 0000-0002-9202-8611, E. A. Konorov² ORCID: 0000-0001-8748-9117,
 Yu. A. Stolpovsky² ORCID: 0000-0003-2537-1900

¹Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
 49, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127550,

²Vavilov Institute of General Genetics Russian Academy of Sciences,
3, Gubkina St., GSP-1, Moscow, Russia, 119991,
³State complex "Zavidovo",
10, v. Kozlovo, Konakovskiy district, Tver region, Russia, 171274,
⁴Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: svbeketov@gmail.com

In the Russian Federation, the indigenous population of sika deer (*Cervus nippon hortulorum*, Swinhoe, 1864) lives only in a small area of the Primorsky Krai. Since the beginning of the twentieth century, along with measures for the conservation of sika deer, they began to acclimatize it, with settling over a large territory and creating new habitats. Currently, up to 40% of the total population of sika deer in the Russian Federation is concentrated in the European part. Despite the long period of existence in the new ecological conditions, molecular genetic methods were not used in the study of sika deer. This work presents for the first time the results of microsatellite analysis of two populations of sika deer from Tver (Zavidovo population) and Kaluga (Tarusa population) regions. *F*-statistics calculated for 12 STR-loci (BMS1788, Rt1, C143, OheQ, FCB193, C217, Rt24, C32, BMS745, NVHRT16, T40, C276) indicate a lack of heterozygous genotypes and indicate a weak divergence of populations. In the interpopulation comparison, the Zavidovo population was distinguished by a greater allelic diversity and a significant number of private alleles. Genetic variability in observed and expected heterozygosity for the Zavidovo population was $H_o = 0.47 \pm 0.08$ and $H_e = 0.51 \pm 0.09$ and for the Tarusa population – $H_o = 0.52 \pm 0.09$ and $H_e = 0.49 \pm 0.08$, respectively. At the same time, both studied populations of sika deer were characterized by a decrease in allelic diversity and heterozygosity relative to the "maternal" aboriginal Far Eastern population. Accordingly, at the present stage of hunting resource management, a reasonable artificial expansion of the range of rare and economically especially valuable animal species due to their dispersal and acclimatization is impossible without a genetic analysis of populations using highly polymorphic molecular markers and the use of standard estimated indicators of dynamic processes in populations. According to the results of the study, it can be concluded that the genetic diversity of the studied acclimatized populations of sika deer in the Tver and Kaluga regions does not differ significantly, and the observed difference in private alleles suggests an independent development of the gene pools of the populations under consideration.

Keywords: sika deer, populations, introduction, microsatellites, allelic variability, genetic divergence.

Пятнистый олень *Cervus nippon* (нативные популяции разных подвидов) в большей или меньшей степени распространён в России, Восточном Китае, Вьетнаме, на полуострове Корея и в Японии, восстановлен на Тайване [1]. В нашей стране охраняемая аборигенная популяция уссурийского (маньчжурского) пятнистого оленя (*C. nippon hortulorum*, Swinhoe, 1864) занимает небольшой район Приморского края в полосе побережья Японского моря между реками Партизанская и Аввакумовка, включая остров Аскольд. В 2002 г. общая численность аборигенной популяции превысила 8500 особей [2].

Однако к концу первой четверти XX века этот подвид стал повсеместно редким и с 1926 г. в СССР, наряду с охранными мероприятиями по сохранению, начали проводить его акклиматизацию, в результате чего пятнистый олень был расселён на значительной территории (заповедники, заказники, охотничьи хозяйства) с образованием новых очагов обитания [3, 4], в том числе вторичных, образовавшихся в результате естественного расселения как, например, во Владимирской и Орловской областях, а также в Хабаровском крае.

За последние годы численность пятнистого оленя в нашей стране существенно

увеличилась и на 2016 г. без учёта животных аборигенной популяции и специализированных пантовых хозяйств составляла примерно 26,7 тыс. особей [5, 6]. При этом до 40% общего поголовья пятнистых оленей сосредоточено в европейской части России (Северо-Западный, Центральный, Поволжский, Северо-Кавказский, Южный, Уральский федеральные округа) [4], причём на Центральный федеральный округ приходится 25% поголовья [5, 6]. Крупные очаги обитания пятнистого оленя сформированы в Московской, Тверской, Калужской, Владимирской и Орловской областях, где благодаря искусственно созданным условиям для воспроизводства (охрана, обильная подкормка, ветеринарный контроль) олени образовали устойчивые группировки популяционного ранга и в настоящее время успешно используются в качестве объектов охоты [4].

За продолжительный период существования в новых природно-климатических и кормовых условиях пятнистые олени претерпели некоторые фенотипические изменения [7, 8]. Однако изменчивость уссурийского пятнистого оленя, акклиматизированного в европейской части России, на молекулярно-генетическом уровне до сих пор не изучена.

Следует отметить, что молекулярные маркеры являются эффективным инструментом, с помощью которого оценивают и характеризуют внутри- и межвидовое генетическое разнообразие [9]. В частности, ДНК-профилирование по STR-маркерам (STR-shot tandem repeat – короткие тандемные повторы) получило широкое распространение в исследовании популяционно-генетической структуры пятнистого оленя. Непосредственно с помощью микросателлитных маркеров была проведена оценка генетического разнообразия вьетнамского подвида пятнистого оленя (*C. nippon pseudaxis*) [10], сычуаньского пятнистого оленя (*C. nippon sichuanicus*) [11], популяций акклиматизированных пятнистых оленей на территории Чехии [12], Польши [13], Литвы [14], аборигенных популяций Японии [15–18], а также отдельных фермерских популяций оленей в Китае [19].

Применение STR-маркеров также позволило выявить антропогенные гибридные формы между пятнистыми и благородными оленями в Литве и Ирландии [20, 21].

Целью нашей работы было проведение сравнительного анализа с помощью микросателлитных маркеров двух популяций пятнистых оленей, локализованных в Тверской (Госкомплекс «Завидово») и Калужской (Госкомплекс «Таруса») областях.

Объекты и методы исследования

Материалом для исследований стали образцы биоматериала (мышечная ткань) двух популяций акклиматизированных пятнистых оленей из федеральных природных заказников Госкомплекс «Завидово» (Тверская область) ($n = 60$ голов) – завидовская популяция (Zavidovo) и Госкомплекс «Таруса» (Калужская обл.) ($n = 10$ голов) – тарусская популяция (Tarusa).

Выделение ДНК из образцов мышечной ткани проводили с использованием набора «QIAmp® DNA Mini Kit» (QIAGEN, Германия) согласно протоколу фирмы-изготовителя. Количественную и качественную оценку полученных препаратов ДНК определяли на микроспектрофотометре NanoPhotometer™ NP80 (Implen, Германия).

Исследование пятнистых оленей осуществляли по 12 STR-маркерам локусов микросателлитов (BMS1788, Rt1, C143, OheQ, FCB193, C217, Rt24, C32, BMS745, NVHRT16, T40, C276).

После начальной денатурации (94 °C, 90 с) проводили 35 циклов амплификации

в следующем температурно-временном режиме: 95 °C, 10 с; 57 °C, 30 с; 68 °C, 60 с, конечная элонгация – 68 °C, 6 мин 30 с.

Капиллярный электрофорез проводили на генетическом анализаторе 3130 Genetic Analyzer (Applied Biosystems | Hitachi) с последующим определением длин аллелей микросателлитов в программном обеспечении GeneMapper® ID-X 1.4. (Applied Biosystems, США).

Для оценки структуры популяций пятнистых оленей использовали показатели: наблюдаемая (H_o) и ожидаемая гетерозиготность (H_e), среднее число аллелей на локус (N_A), число эффективных аллелей на локус (N_E), количество информативных аллелей с частотой более 5% ($N_A \geq 5\%$), аллельное разнообразие (A_R) [22], коэффициент инбридинга (F_{IS}). Расчёт показателей генетического и аллельного разнообразия производили с помощью программного обеспечения GenAlEx 6.5 [23] и пакета для языка R «diveRsity», определение приват-аллелей и F -статистик по исследованным локусам с использованием PopGenReport Version 3.0.4. [24].

Внутрипопуляционные генетические различия оценивали по евклидовым дистанциям, степень генетической дифференциации исследуемых популяций пятнистых оленей определяли на основании попарных генетических различий (индекс фиксации F_{ST}) [25]. Филогенетические отношения устанавливали путём построения Neighbor-net дендрограмм. Метод Neighbor-net основан на агломерации кластеров, где в качестве исходных данных применяют матрицу расстояний [26].

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) проводили с помощью R пакета adegenet [27] с визуализацией в ggplot2 [28].

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований с использованием STR-маркеров были определены генотипы 70 пятнистых оленей. Как показано в таблице 1, число аллелей в расчёте на локус микросателлитов варьировало от $4,1 \pm 0,7$ у оленей тарусской популяции до $6,0 \pm 1,2$ в завидовской популяции, выявляемое аллельное разнообразие в обеих популяциях было примерно одинаковым и составило $3,4 \pm 0,5$ и $3,5 \pm 0,6$ соответственно. Однако число эффективных аллелей было больше в завидовской популяции – $2,9 \pm 0,5$. Кроме того, значения наблюдаемой (H_o) и ожи-

Таблица 1 / Table 1

Параметры аллельного разнообразия в изучаемых популяциях пятнистых оленей
Parameters of allelic diversity in the studied populations of sika deer

Популяция / Population	n	N_A	N_E	$N_A \geq 5\%$	A_R
Тарусская / Tarusa	10	4,1±0,7	2,49±0,33	4,1±0,7	3,4±0,5
Завидовская / Zavidovo	60	6,0±1,2	2,9±0,5	3,5±0,6	3,5±0,6

Примечание: N_A – среднее число аллелей на локус; N_E – число эффективных аллелей на локус; $N_A \geq 5\%$ – число информативных аллелей с частотой более 5%; A_R – аллельное разнообразие.

Note: N_A – average number of alleles per locus; N_E – number of effective alleles per locus; $N_A \geq 5\%$ – number of informative alleles with the frequency more than 5%; A_R – allelic diversity.

Таблица 2 / Table 2

Параметры генетического разнообразия в изучаемых популяциях пятнистых оленей
Parameters of genetic diversity in the studied populations of sika deer

Популяция / Population	n	H_O	H_E	F_{IS} (F_{IS} 95% CI)
Тарусская / Tarusa	10	0,52±0,09	0,49±0,08	-0,06 (-0,23; -0,005)
Завидовская / Zavidovo	60	0,47±0,08	0,51±0,09	0,05 (-0,01; 0,092)

Примечание: H_O – наблюдаемая гетерозиготность; H_E – ожидаемая гетерозиготность; F_{IS} – коэффициент инбридинга; CI – доверительный интервал.

Note: H_O – observed heterozygosity; H_E – expected heterozygosity; F_{IS} – inbreeding coefficient; CI – confidence interval.

даемой гетерозиготности (H_E) в рассматриваемых популяциях оказались очень близки между собой. Особенно это характерно для оленей тарусской популяции ($H_O = 0,52 \pm 0,09$ и $H_E = 0,49 \pm 0,08$), которой были свойственны случайные спаривания и некоторый избыток гетерозигот – $F_{IS} = -0,060$, напротив, завидовская популяция ($H_O = 0,47 \pm 0,08$ и $H_E = 0,51 \pm 0,09$) характеризуется дефицитом гетерозигот и незначительным инбридингом – $F_{IS} = 0,051$ (табл. 2).

Всего в рассматриваемых популяциях пятнистых оленей было обнаружено 27 приват-аллелей, из которых 26 встречались в завидовской популяции (локус BMS1788 – 4 аллели, Rt1 – 2 аллели, C143 – 1 аллель, OheQ –

2 аллели, FCB193 – 10 аллелей, C32 – 1 аллель, BMS745 – 3 аллели, NVHRT16 – 1 аллель, T40 – 1 аллель, C276 – 1 аллель) и лишь 1 приват-аллель – в тарусской (локус Rt1) с вероятностью 0,02. При этом непосредственно в завидовской популяции только 5 аллелей встречались с частотой более 5% (от 6 до 20%) – это аллель 253 локуса Rt1, аллели 140, 158 и 166 локуса FCB193, аллель 307 локуса C32 и аллель 137 локуса BMS745.

При рассмотрении F -статистик по исследованным локусам завидовской и тарусской популяций пятнистых оленей (табл. 3) среднее значение F_{IS} составило 0,0445, что указывает на незначительный недостаток гетерозиготных генотипов; $F_{ST} = 0,0090$ свидетельствует

Таблица 3 / Table 3

F -статистика по исследованным локусам рассматриваемых популяций пятнистых оленей
 F -statistic for the studied loci of the considered populations of sika deer

Локус / Locus	F_{IT}	F_{ST}	F_{IS}
C143	-0,0569	-0,0261	-0,0300
Rt24	-0,0493	-0,0251	-0,0236
C32	-0,0222	-0,0197	-0,0025
C217	0,0273	-0,0106	0,0375
T40	-0,0290	-0,0088	-0,0200
BMS1788	0,2731	-0,0023	0,2748
Rt1	0,0753	0,0044	0,0713
BMS745	0,0001	0,0090	-0,0090
C276	0,0411	0,0110	0,0304
NVHRT16	0,1036	0,0289	0,0769
FCB193	0,0486	0,0354	0,0136
OheQ	0,0214	0,1119	0,1145
Средняя / Average	0,0361	0,0090	0,0445

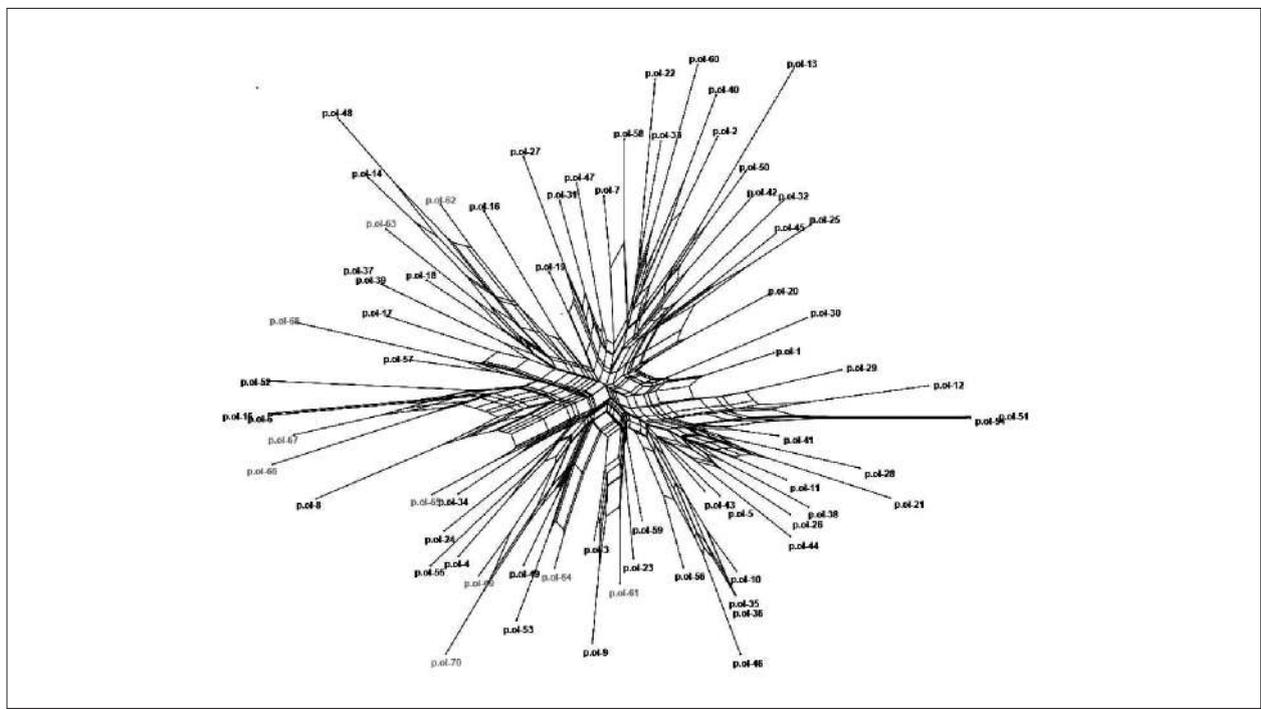


Рис. 1. Neighbor-net дендрограмма взаимоотношений исследуемых популяций пятнистых оленей, построенная на основе матрицы евклидовых дистанций. Здесь и на следующем рисунке чёрным цветом показаны пятнистые олени завидовской, серым цветом – тарусской популяции
Fig. 1. Neighbor-net dendrogram of relationships between the studied populations of sika deer, built on the basis of the Euclidean distance matrix. Here and in the following figure, sika deer of the Zavidovo population are shown in black, and the Tarusa population – in gray

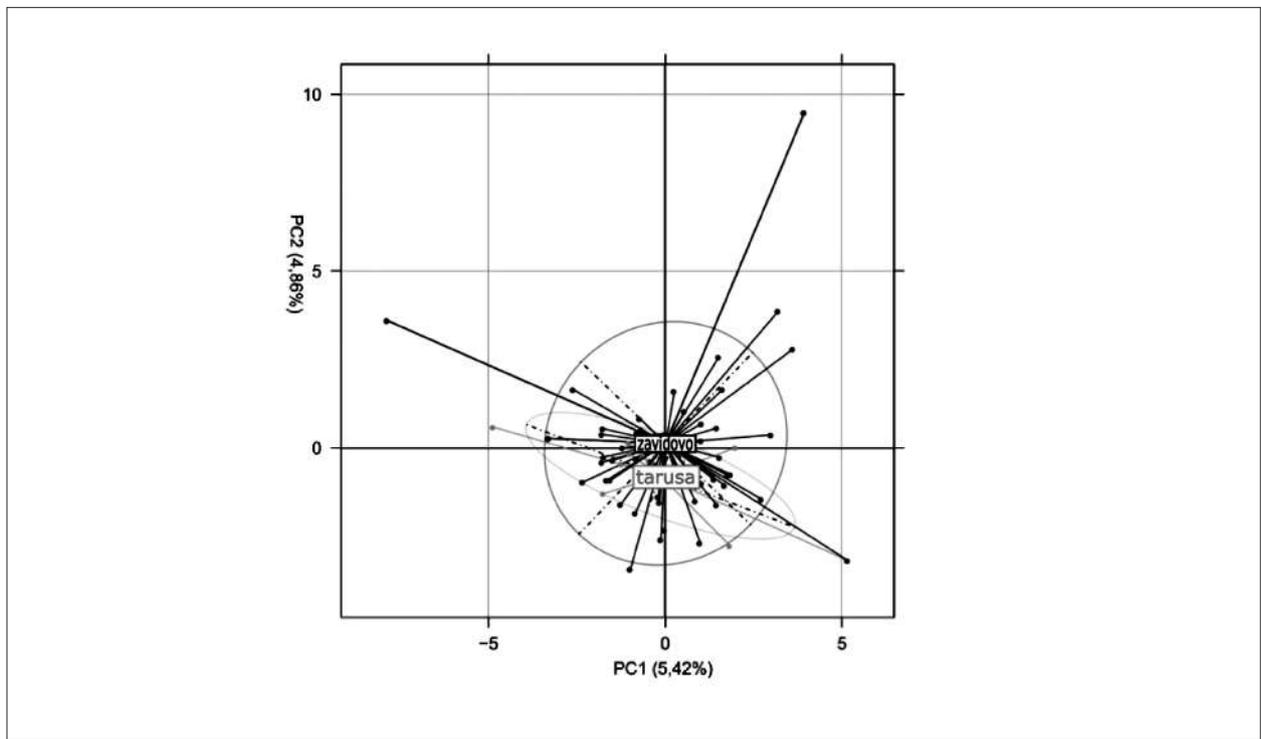


Рис. 2. Проекция особей исследуемых популяций пятнистых оленей на плоскости двух координат по данным PCA-анализа
Fig. 2. Projection of individuals of the studied populations of sika deer on the plane of two coordinates according to PCA analysis data

о слабой дивергенции популяций, при этом наибольший вклад в подразделённость вносит локус *OheQ*; согласно значению F_{IT} вероятность встречи аллелей общего предка невысока и составляет 0,036.

В свою очередь, рассчитанное попарное значение межпопуляционных генетических дистанций F_{ST} , соответствующее коэффициенту генетической дифференциации Нея (G_{ST}), [29], оказалось очень близко к нулю $0,011 \pm 0,002$, что также указывает на отсутствие различий рассматриваемых популяций. Особенно отчётливо это просматривается на сетевой дендрограмме (рис. 1). Сходная картина наблюдается также и по результатам исследования РСА. Фактически две популяции перекрываются с существенным отклонением по отдельным животным (рис. 2).

Соответственно, по результатам нашего исследования незначительное снижение гетерозиготности наблюдается в завидовской популяции, при этом по сравнению с оленями тарусской популяции в ней был более высокий уровень аллельного разнообразия и большее количество приват-аллелей, что отчасти можно объяснить несопоставимым объёмом анализируемых выборок. В то же время слабая межпопуляционная дифференциация свидетельствует в пользу близкого генетического родства завидовской и тарусской популяций. Однако необходимо отметить, что наличие значительных различий между акклиматизированными популяциями по количеству приватных аллелей позволяет предположить независимое изолированное существование этих популяций.

Представляет интерес сравнение наших данных с результатами чешских исследователей, ранее изучавших микросателлитный полиморфизм в аборигенной приморской популяции пятнистых оленей (*C. nippon hortulorum*) из Лазовского и Сихотэ-Алинского заповедников и интродуцированной чешской популяции [12], изначально образованной животными разных подвидов пятнистых оленей (*C. nippon yesoensis*, *C. nippon nippon* и *C. nippon hortulorum*). Примечательно, что, в отличие от завидовской и особенно тарусской популяций, приморские и чешские пятнистые олени характеризовались большим дефицитом гетерозигот и более высоким уровнем инбридинга, $F_{IS} = 0,132$ и $F_{IS} = 0,183$ соответственно.

Однако сравнение популяций по ожидаемой гетерозиготности (H_E), как менее чувствительному к размеру выборки параметру генетической изменчивости, показало, что зна-

чение H_E в чешской – 0,735 и приморской популяциях – 0,710 по сравнению с завидовской – 0,510 и тарусской – 0,490 оказалось выше. То же самое можно и сказать про аллельное разнообразие, которое в приморской популяции составило $A_R = 10,19$ при среднем числе аллелей на локус – $N_A = 10,23$, а в чешской – $A_R = 9,98$ и $N_A = 10$, что в три раза превышает соответствующие параметры завидовской и тарусской популяций.

Очевидно, что акклиматизация пятнистого оленя в Тверской и Калужской областях привела к утере генетического и аллельного разнообразия, что снижает адаптивный потенциал рассматриваемых популяций и могло произойти как за счёт ограниченного числа интродуцированных особей (эффект основателя), так и из-за случайных процессов, например, дрейфа генов и сопутствующего ему инбридинга [30].

Пятнистый олень считается инвазивным видом в Европе и для местной фауны главная угроза интродуцированных пятнистых оленей заключается в их спонтанной гибридизации с благородным оленем. Особенно остро этот вопрос стоит в Ирландии и Великобритании, при этом отдельные гибридные формы фенотипически могут не проявляться.

В европейской части России проблема межвидовой гибридизации пятнистого и благородного оленей пока не столь актуальна. Тем не менее, несмотря на близкое генетическое родство исследованных нами популяций пятнистого оленя, по наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности завидовская популяция характеризуется некоторым дефицитом гетерозигот, а тарусская находится в состоянии панмиксии, что теоретически не исключает у последней возможности межвидовых скрещиваний.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы. 1. Генетическое разнообразие исследованных акклиматизированных популяций пятнистого оленя Тверской и Калужской областей достоверно не отличается. При этом различие в количестве приватных аллелей предполагает независимое развитие генофондов популяций. 2. Резкое сокращение аллельного разнообразия (в три раза) генофонда исследованных популяций по сравнению с «материнской» Приморской популяцией показывает, что они нуждаются в проведении мероприятий по «оздоровлению»

их генофонда с целью увеличения жизнеспособности.

В целом, подводя общий итог, можно отметить, что на современном этапе управления охотничьими ресурсами обоснованное искусственное расширение ареала редких и особенно ценных в хозяйственном отношении видов животных за счёт расселения их в охотничьи угодья невозможно без проведения генетического анализа популяций с использованием высоко полиморфных молекулярных маркеров. При этом следует применять стандартные оценочные показатели динамических процессов в популяциях, в том числе параметры аллельного и генетического разнообразия, индексы фиксации и другие.

References

1. McCullough E.D.R. Sika deer in Taiwan // Sika deer: Biology and management of native and introduced populations / Eds. D.R. McCullough, S. Takatsuki, K. Kaji. Tokyo: Springer, 2009. P. 549–560. doi: 10.1007/978-4-431-09429-6_37
2. Red Book of Primorsky Krai: Animals. Rare and endangered animal species. Vladivostok: AVK “Apelsin”, 2005. 408 p. (in Russian).
3. Sokolov I.I. Fauna of the USSR. Mammals. Ungulate animals (groups Perissodactyla and Artiodactyla). Moskva-Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR, 1959. V. 4. No. 3. 640 p. (in Russian).
4. Sika deer (*Servus nippon* Temmink. 1838) [Internet resource] <https://www.ohotcontrol.ru> (Accessed: 18.09.2021) (in Russian).
5. Alazneli I.D., Romanov A.P., Kaledin A.P. Sika deer resources and their use in the Russian Federation, Moscow and Tver regions // Mezhdunarodnyy nauchnyy teoretiko-prakticheskiy almanakh. Smolensk: IP Borisova S.I., 2017. V. 2. P. 87–92 (in Russian).
6. Kaledin A.P., Filatov A.I., Ostapchuk A.M. Fundamentals of hunting resource science. Moskva: Era, 2018. 344 p. (in Russian).
7. Petrashov V.V. Sika deer in the Khopersky Reserve // Okhota i okhotnichekhozyaystvo. 1974. V. 2. P. 8–9 (in Russian).
8. Petrashov V.V. Morphological characteristics of the sika deer of the Khopersky Reserve // Izvestiya TSKhA. 1977. V. 5. P. 162–163 (in Russian).
9. Chesnokov Yu.V., Artemeva A.M. Evaluation of the measure of informational polymorphism of genetic diversity // Selskokhozyaystvennaya biologiya. 2015. V. 50. No. 5. P. 571–578. doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.571rus
10. Thevenon S., Thuy L.T., Ly L.V., Maudet F., Bonnet A., Jarne P., Maillard J.-C. Microsatellite analysis of genetic diversity of the Vietnamese sika deer (*Cervus nippon pseudaxis*) // J. Hered. 2004. V. 95. No. 1. P. 11–18. doi: 10.1093/jhered/esh001
11. He Y., Wang Z.H., Wang X.M. Genetic diversity and population structure of a Sichuan sika deer (*Cervus sichuanicus*) population in Tiebu Nature Reserve based on microsatellite variation // Dongwuxue Yanjiu. 2014. V. 35. No. 6. P. 528–536. doi: 10.13918/j.issn.2095-8137.2014.6.528
12. Krojerová-Prokešová I.K., Barančeková M., Voloshina I., Myslenkov A. Dybowski's sika deer (*Cervus nippon hortulorum*): Genetic divergence between natural Primorian and introduced Czech populations // The Journal of Heredity. 2013. V. 104. No. 3. P. 1–15. doi: 10.1093/jhered/est006
13. Radko A., Zalewski D., Rubi D., Szumiec A. Genetic differentiation among 6 populations of red deer (*Cervus elaphus* L.) in Poland based on microsatellite DNA polymorphism // Acta Biologica Hungarica. 2014. V. 65. P. 414–427. doi: 10.1556/ABiol.65.2014.4.6
14. Pūraitė I., Paulauskas A. Genetic diversity of the sika deer *Cervus nippon* in Lithuania // Balkan Journal of Wildlife Research. 2016. V. 3. No. 1. P. 19–25. doi: 10.15679/bjwr.v3i1.40
15. Nagata J., Masuda R., Koichi K., Ochiai K., Asada M., Yoshida M.C. Microsatellite DNA variation of the sika deer, *Cervus nippon*, in Hokkaido and Chiba // Mammal Study. 1998. V. 23. P. 95–101.
16. Tamate H.B., Okada A., Minami M., Ohnishi N. Genetic variations revealed by microsatellite markers in a small population of the sika deer (*Cervus nippon*) on Kinkazan Island, Northern Japan // Zoological Science. 2000. V. 17. No. 1. P. 47–53. doi: 10.2108/zsj.17.47
17. Okada A., Tamate H.B. Pedigree analysis of the sika deer (*Cervus nippon*) using microsatellite markers // Zoolog. Sci. 2000. V. 17. No. 3. P. 335–340. doi: 10.2108/zsj.17.335
18. Konishi S., Hata S., Matsuda S., Arai K., Mizoguchi Y. Evaluation of the genetic structure of sika deer (*Cervus nippon*) in Japan's Kanto and Tanzawa mountain areas, based on microsatellite markers // Anim. Sci. J. 2017. V. 88. No. 11. P. 1673–1677. doi: 10.1111/asj.12844
19. Shenjin L., Yang Y., Wang X. Genetic diversity analysis by microsatellite markers in four captive populations of the sika deer (*Cervus nippon*) // Biochemical Systematics and Ecology. 2014. V. 57. P. 95–101. doi: 10.1016/j.bse.2014.07.015
20. Pūraitė I., Gibiežaitė J.M., Paulauskas A. Genetic analysis of red deer *Cervus elaphus* and sika deer *Cervus nippon* to evaluate possible hybridisation in Lithuania // Baltic Forestry. 2017. V. 23. No. 3. P. 683–690.
21. McDevitt A.D., Edwards C.J., O'Toole P., O'Sullivan P., O'Reilly Ca., Carden R.F. Genetic structure of, and hybridisation between, red (*Cervus elaphus*) and sika (*Cervus nippon*) deer in Ireland // Mamm. Biol. 2009. V. 74. P. 263–273. doi: 10.1016/j.mam-bio.2009.03.015
22. Kalinowski S.T. Counting alleles with rarefaction: Private alleles and hierarchical sampling designs // Conser-

- vation Genetics. 2004. No. 5. P. 539–543. doi: 10.1023/B:COGE.0000041021.91777.1a
23. Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update // Bioinformatics. 2012. V. 28. No. 19. P. 2537–2539. doi: 10.1093/bioinformatics/bts460
24. Adamack A.T., Gruber B. PopGenReport: simplifying basic population genetic analyses in R // Methods in Ecology and Evolution. 2014. No. 5. P. 384–387. doi: 10.1111/2041-210X.12158
25. Weir B.S., Cockerham C.C. Estimating F -Statistics for the analysis of population structure // Evolution. 1984. V. 38. P. 1358–1370.
26. Huson D.H., Bryant D. Application of phylogenetic networks in evolutionary studies // Mol. Biol. Evol. 2006. V. 23. No. 2. P. 254–267. doi: 10.1093/molbev/msj030
27. Jombart T. Adegenet: a R package for the multivariate analysis of genetic markers // Bioinformatics. 2008. V. 24. No. 11. P. 1403–1405. doi: 10.1093/bioinformatics/btn129
28. Wickham H. Ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag, 2009. 268 p. doi: 10.1007/978-3-319-24277-4
29. Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1973. V. 70. No. 12. P. 3321–3323.
30. Makeyeva V.M., Belokon M.M., Smurov A.V. Geno-urbanology as a basis for the conservation of biodiversity and ecosystems in the context of global urbanization // Uspekhi sovremennoy biologii. 2013. V. 133. No. 1. P. 19–34 (in Russian). doi: 10.1134/S207908641304004

Литофагия *Alces alces* L. на охраняемых территориях Якутии

© 2022. В. В. Степанова¹, к. б. н., с. н. с., А. В. Аргунов¹, к. б. н., с. н. с.,
Д. И. Тирский², к. б. н., с. н. с., Р. А. Кириллин¹, инженер-исследователь,
И. М. Охлопков¹, к. б. н., директор,

¹Институт биологических проблем криолитозоны
Сибирского отделения Российской Академии наук,
677980, Россия, г. Якутск, пр. Ленина, д. 41,

²Государственный заповедник «Олёкминский»,
678100, Россия, г. Олёкминск, ул. Бровина, д. 6,
e-mail: valstep@yandex.ru, olekmazap-nauka@yandex.ru

Регистрация литофагии лосей посредством фотоловушек проведена на шести солонцах в охраняемых территориях Южной и Центральной Якутии. Продолжительность литофагии лосей в среднем составила ($M \pm m$): в Южной Якутии $12,0 \pm 1,1$ мин, в Центральной Якутии – $8,7 \pm 7,8$ мин. В среднем количество посещений за сутки животными составило: в Южной Якутии – 5,7 (май–июль), в Центральной Якутии – 2,1 (июнь–сентябрь). Активное посещение солонца животными зарегистрировано в тёмное время суток с 20 ч до 4 ч. Посещаемость солонца по месяцам выше на обоих участках в июне. Соотношение особей, посетивших солонцы, по полам: самцы – 60,9%, самки – 39,1% (Центральная Якутия); самцы – 45,7%, самки – 54,3% (Южная Якутия). Процент телят составил: в Южной Якутии – 10,2%, в Центральной Якутии – 30,3%.

Ключевые слова: лоси, посещаемость солонца, продолжительность солонцевания, временное распределение литофагии.

Lithophage *Alces alces* L. in the protected territories of Yakutia

© 2022. V. V. Stepanova¹ ORCID: 0000-0003-3630-0091^{*}

A. V. Argunov¹ ORCID: 0000-0003-3058-6260^{*}, D. I. Tirskiy² ORCID: 0000-0002-2751-3442^{*}

R. A. Kirillin¹ ORCID: 0000-0002-6369-085X^{*}, I. M. Okhlopkov¹ ORCID: 0000-0002-6227-5216^{*}

¹Institute of Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
41, Lenina Ave., Yakutsk, Russia, 677980,

²State Reserve “Olekminsky”,
6, Brovina St., Olekminsk, Russia, 678100,
e-mail: valstep@yandex.ru, olekmazap-nauka@yandex.ru

Registration of moose lithophagy by means of photo traps was carried out on six salt lick in the protected territories of Southern and Central Yakutia. The duration of moose lithophagy is up to 132 min, with an average of 9–12 min. Females salted longer than males. In Southern Yakutia, half of the visits to lick occur at the darkest time of the day from midnight to 4 am (50.5%), and in Central Yakutia from 8 pm to 12 pm (42.5%). The lowest attendance of lick was observed in both cases during daylight hours from 8 am to 8 pm (5.6% and 8.6%). In both parts of the range, females are more likely than males to visit lick at dawn from 4 am to 8 am. The highest activity of salting in both areas is observed in June: in Southern Yakutia – 5.7 moose per day, in Central Yakutia – 2.1 moose per day. This circumstance is explained by the period of calving in females and the development of horns in males. For the entire observation period, the average number of visits per day by animals was: in Southern Yakutia – 3.7 (in the period from May to July), in Central Yakutia – 1.0 (in the period from June to August). In southern Yakutia, there is a sharp increase in male visits to lick in the month of June, which falls sharply in July. In Central Yakutia, this is not observed. The sex ratio of individuals who visited salt lick was: in Central Yakutia males – 60.9%, females – 39.1%; in Southern Yakutia males – 45.7%, females – 54.3%. The percentage of calves was: in Southern Yakutia – 10.2%, in Central Yakutia – 30.3%. In Southern Yakutia, females with moose calves accounted for 3.4% of all visits, and in Central Yakutia – 11.2%.

Keywords: moose, salt lick attendance, duration of salt licking, lithophage time distribution.

В зарубежной литературе по литофагии животных за последние годы можно выделить работы канадских, американских и финских учёных [1–6]. В России углублённо изучением солонцевания животных в настоящее время занимаются В.И. Бгатов [7, 8] и А.М. Паничев [9, 10], который ввёл новые термины в этой области и выявил возможные новые причины литофагии.

Механизмы, контролирующие гомеостаз натрия в природе, являются основными механизмами эволюционного возникновения способности животных приспосабливаться к жёстким условиям окружающей среды. Ведущую роль в поддержании осмотического гомеостаза в организме животных играют ионы натрия, на долю которого приходится более 90% внеклеточных катионов. Максимальный скачок химизма растений обычно связан с высоким содержанием в зелёной растительной молодости калия, и концентрация калия в молодых листьях может быть в два–три раза выше, чем в листьях последующих вегетативных фаз. В этот период, возможно, наблюдается значительное снижение соотношения натрия к калию в организме жвачных животных. При потреблении натрия содержание калия в организме снижается пропорционально увеличению содержания натрия, благодаря чему сохраняется постоянное осмотическое давление. Избыточное потребление калия вследствие обеднения организма натрием может привести к ацидозу, что повышает вероятность воспалительных изменений в организме.

Между тем эта немаловажная часть экологии диких копытных слабо освещается в литературе. Новизна исследований заключается в том, что углублённым изучением литофагии животных в северо-восточной части Сибири до настоящего времени никто не занимался. Территория Якутии расположена в северных широтах и характеризуется суровыми климатическими условиями, которые требуют адаптационных пертурбаций в организме животных и в их поведении. Некоторые аспекты литофагиальных особенностей диких копытных Якутии освещены нами в предыдущих работах [10, 12]. Проведённые исследования могут быть применены при проведении избирательной охоты на лося [13].

Цель работы – изучить этологические процессы при сезонных функциональных и морфологических изменениях в организме лосей (*Alces alces* L., 1758) в криогенных условиях Севера, проявляющихся в литофагиальном

пристрастии, сравнение особенностей литофагии лосей в Южной и Центральной Якутии.

Материалы и методика исследований

Регистрация летне-осенней литофагии лосей посредством фотоловушек *Bushnell* и *Super Scouter* проведена в Центральной Якутии на пяти природных солонцах, в том числе на левобережье р. Лена на участках особо охраняемых природных территорий (ресурсных резерватов) – на трёх солонцах («Джероно», «Элик-Маара – 1» и «Элик-Маара – 2», 61°45' с. ш., 128°16' в. д.), на правобережье – на двух солонцах («Уолбут», 61°34' с. ш., 130°34' в. д. и «Лютенга», 61°03' с. ш., 128°54' в. д.) и в Южной Якутии на природном солонце «Сордонноох» (пойма р. Олёкма, 59°05' с. ш., 121°48' в. д.) в пределах территории государственного заповедника «Олёкминский» (рис. 1).

Фотоловушки с установленной датой и временем фиксировались на деревьях на высоте около 1–2 м на расстоянии 5–6 м от солонцов. Фотографирование движущихся объектов фиксировалось с промежутками в 5 секунд. Все камеры оборудованы инфракрасной подсветкой *Low-glow*, позволяющей фотографировать и записывать видео в тёмное время суток.

В Южной Якутии проведено 94 фотоловушко-суток, в том числе по месяцам: май – 12, июнь – 53, июль – 29. За обозначенный период получено и проанализировано 3373 фотографии. В Центральной Якутии проведено 235 фотоловушко-суток, в том числе по месяцам: июнь – 34, июль – 60, август – 65, сентябрь – 60, октябрь – 16. За данный период получено и проанализировано 12152 фотографии.

Учёт лосей по фотоловушкам проводили согласно [3]. Полученные фотоматериалы оценены на предмет фиксации тех или иных видов животных. Определялось количество и продолжительность посещений, пол и возрастная группа особи. Сеголетки отмечены вместе с самкой. Полученные после обработки фотографий данные пересчитывали на количество посещений животными и общее количество посетивших солонец лосей.

Малое количество животных при разовых посещениях позволили идентифицировать отдельные особи при повторных заходах и высчитать предполагаемое количество индивидов на том или ином участке. Идентификация особей производилась по форме рогов

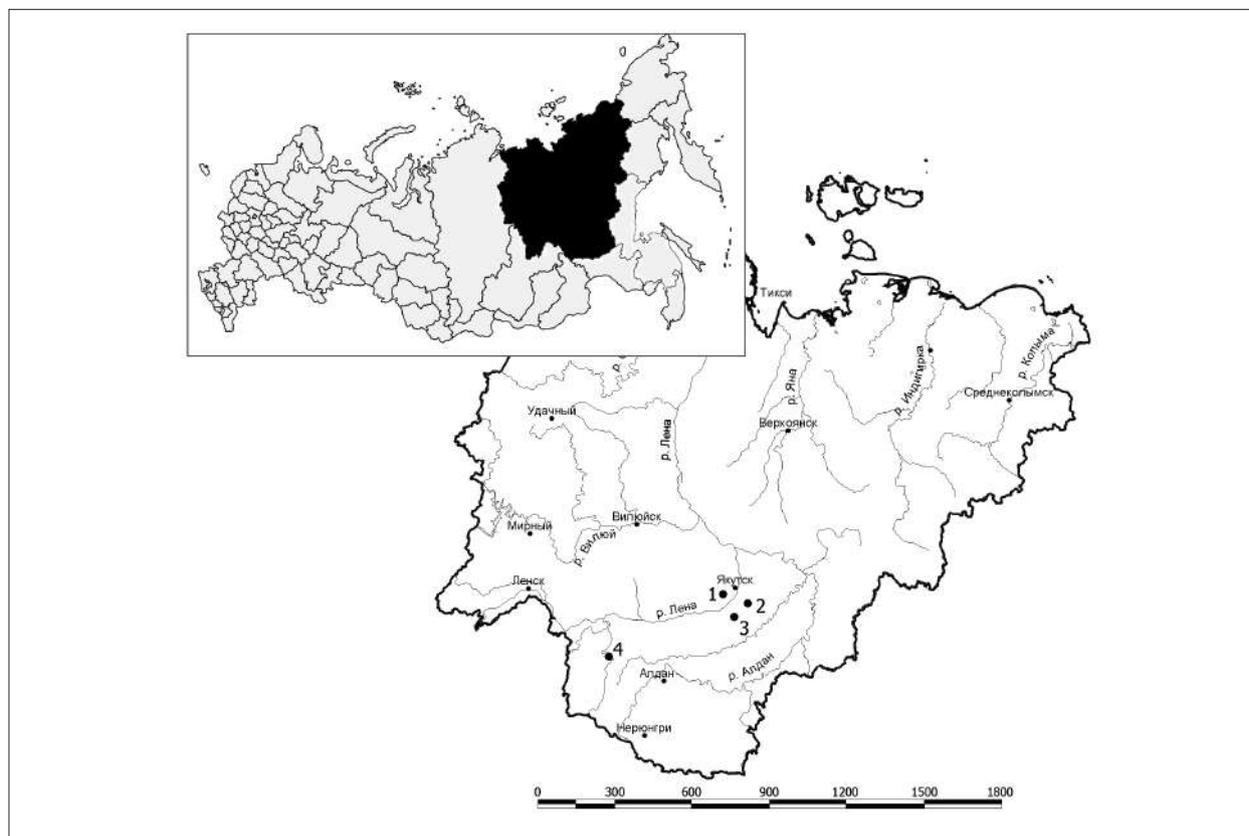


Рис. Карта-схема местонахождения солонцов. Центральная Якутия: 1) «Джероно», «Элик-Маара – 1», «Элик-Маара – 2»; 2) «Уолбут»; 3) «Лютенга». Южная Якутия: 4) «Сордонноох»
Fig. The schematic map of the location of salt licks. Central Yakutia: 1) "Jerono", "Elik-Maara – 1", "Elik-Maara – 2"; 2) "Walbut"; 3) "Lutenga". South Yakutia: 4) "Sordonnookh"

и количеству отростков на каждой стороне (для самцов), форме серьги или бороды, индивидуальным особенностям, характеру шёрстного покрова, наличию различных повреждений шёрстного покрова и рогов.

Статистическая обработка материала проводилась по общепринятой статистико-вариационной методике с применением программы Excel.

Отличительные черты Южной и Центральной Якутии

Отличия факторов, которые определяют стрессовые ситуации и последующую тягу к солонцеванию жвачных животных, в Южной и Центральной Якутии сводятся к следующему.

Климатические факторы. Южная Якутия заметно отличается от Центральной сравнительно мягкой зимой, прохладным и дождливым летом. Среднегодовая температура в Южной Якутии выше на 4,3 °С, чем в Центральной. Среднемесячная темпе-

ратура января здесь также выше на 8,9 °С, а среднемесячная температура июля, наоборот, ниже на 1,1 °С. Также отмечается различие в годовом количестве осадков: в Центральной Якутии оно намного меньше (238 мм/год), чем в Южной (326 мм/год), что проявляется в относительно неглубоком снежном покрове и засушливом лете. Высота снежного покрова в Центральной Якутии ниже из-за менее выраженной расчленённости рельефа и малого количества осадков (в среднем 56 см), что создаёт благоприятные условия для передвижения лося в снежный период. В Южной Якутии глубокоснежье (в среднем 73 см) на отдельных участках ареала подталкивает лосей к миграциям в места, где высота снега меньше.

Переход от зимы к лету в южной части Якутии относительно растянутый и занимает примерно два месяца, тогда как в Центральной Якутии весна протекает стремительно: зимние морозы, которые отступают в конце апреля, сменяются резким приходом жары. Здесь в течение одного месяца (май) температура с

минусовых показателей поднимается в среднем до +25 °С. Весной первые плюсовые температуры в Южной Якутии отмечаются раньше – в начале апреля, в Центральной Якутии чуть позже – в конце апреля.

Центральная Якутия находится ближе к Полярному кругу, по этой причине в начале июля световой день длится на полтора часа дольше, чем в Южной Якутии – около 20 ч, в конце декабря на полтора часа меньше – около 5 ч.

Пищевые факторы. По нашим наблюдениям в Центральной Якутии массовое появление первоцветов на первых проталинах на склонах сопок приурочено к началу мая, а в Южной – к концу апреля. В Центральной Якутии почвы в основном палево-осолоделые и относятся к Центральноякутской таёжно-алаской почвенной провинции, в Южной – дерново-карбонатные и относятся к Якутской Восточно-Сибирской таёжно-мелкодолинной провинции. Это отличие в почвообразовании создаёт предпосылки для изучения литофагии.

Антропогенные факторы. В Центральной Якутии находится г. Якутск, что предопределяет его густонаселённость людьми. Наличие на этом участке Федеральной автотрассы А360 и Амуро-Якутской железнодорожной магистрали служит дополнительным фактором беспокойства для крупных диких животных.

Результаты и обсуждение

За период исследований зарегистрировано одиночных и групповых посещений солонцов в Южной Якутии – 374, в Центральной Якутии – 122. В Южной Якутии зафиксировано пребывание на солонцах, включая повторные заходы одних и тех же индивидов, – 471 лосей, в Центральной Якутии – 215 лосей. При идентификации особей по половозрастному признаку выявлено в Южной Якутии –

39 индивидов (16 самцов, 19 самок и 4 телёнка), в Центральной Якутии – 33 лося (14 самцов, 9 самок и 10 телят). Максимальное количество солонцевавших одновременно лосей составило 5 особей. Максимальное количество лосей, посетивших солонец за сутки, составило 8 особей (не считая повторных заходов).

По результатам исследований литофагия лосей в Якутии продолжалась до 132 мин, но в среднем показатель гораздо меньше – 9–12 мин (табл. 1).

По нашим наблюдениям продолжительность литофагии лосей отличается в зависимости от пола: самки солонцуют дольше, чем самцы, что характерно и для Центральной, и для Южной Якутии.

Сравнение продолжительности литофагии лосей Южной и Центральной Якутии показало, что в Южной Якутии солонцевание продолжительнее на 27,5%. Следует отметить, что район исследований в Южной Якутии относится к заповедной зоне, поэтому фактор беспокойства здесь сведён к минимуму. Возможно, этот фактор играет определяющую роль в продолжительности солонцевания.

Кроме того, нами отмечено различие времени пребывания животных на солонце в зависимости от времени суток. Для определения суточной посещаемости солонца мы разделили сутки на две равные части: с 8 ч утра до 20 ч вечера и с 20 ч вечера до 8 ч утра. Большая часть времени солонцевания животными выпадает на период с 20 ч до 8 ч. Исходя из этого, мы разделили этот период ещё на три части: закат – с 20 до 24 ч; самое тёмное время суток – с 24 до 4 ч; рассвет – с 4 до 8 ч (табл. 2).

В Южной Якутии половина посещений солонца приходится на самое тёмное время суток с полуночи до 4 ч утра (50,5%), а в Центральной Якутии – с 20 до 24 ч (42,5%). Возможно, это связано с тем, что рассвет в Центральной Якутии в июне начинается в 2 ч 30 мин, что раньше, чем в Южной Якутии

Таблица 1 / Table 1

Продолжительность литофагии лосей (мин)
The duration of lithophage moose (min)

Часть ареала Part of area	Самцы / Males			Самки / Females			Общее / General		
	$M \pm m^*$	Limit**	n^{***}	$M \pm m$	Limit	n	$M \pm m$	Limit	n
Южная Якутия Southern Yakutia	11,1±1,1	1–84	175	13,5±2,2	1–132	105	12,0±1,1	1–132	280
Центральная Якутия Central Yakutia	8,0±1,0	1–40	80	9,2±0,8	1–36	90	8,9±0,7	1–40	170

Примечание: * – среднее арифметическое значение ± средняя арифметическая ошибка; ** – минимальное и максимальное предельные значения; *** – размер выборки.

Note: * – arithmetical mean ± arithmetic error; ** – minimum and maximum limit values; *** – sample size.

Таблица 2 / Table 2

Временное распределение посещаемости солонца (%)
The temporal distribution of attendance of the salt lick (%)

Часть ареала Part of area	Самцы / Males				n**	Самки / Females				n	Общее / General				n
	8–20*	20–24	0–4	4–8		8–20	20–24	0–4	4–8		8–20	20–24	0–4	4–8	
Южная Якутия Southern Yakutia	8,8	13,2	52,4	25,6	250	8,2	8,9	47,1	35,8	134	8,6	11,7	50,5	29,2	384
Центральная Якутия Central Yakutia	6,7	43,3	30,6	19,4	74	4,5	41,7	23,7	30,1	88	5,6	42,5	27,15	24,75	162

Примечание: * – период времени суток по часам; ** – количество посещений.
Note: * – time period of the day by the hour; ** – number of visits.

Таблица 3 / Table 3

Суточная посещаемость солонца по месяцам (отношение посещений солонца к ловушко-суткам)
Daily attendance of salt lick by months (the ratio of visits to the salt lick to a trap-days)

Часть ареала Part of area		Южная Якутия Southern Yakutia	Центральная Якутия Central Yakutia
Самцы Males	n*	222	81
	V**	0,7	–
	VI	3,8	0,8
	VII	0,4	0,7
	VIII	–	0,1
	V–VIII	2,3	0,5
Самки Females	n	126	89
	V	0,7	–
	VI	1,9	1,3
	VII	0,6	0,6
	VIII	–	0,06
	V–VIII	1,4	0,5
Общее General	n	348	170
	V	1,4	–
	VI	5,7	2,1
	VII	1,0	1,4
	VIII	–	0,16
	V–VIII	3,7	1,0

Примечание: * – количество посещений солонца; ** – месяцы.
Note: * – number of visits to the sun; ** – months.

на один час десять минут. Наименьшая посещаемость солонца наблюдалась в обоих случаях в светлое время суток с 8 до 20 ч (5,6 и 8,6%), что, скорее всего, обусловлено антропофобностью вида. В обеих частях ареала самки охотнее, чем самцы, посещают солонец на рассвете с 4 до 8 ч утра. Этот факт мы связываем с тем, что самки в присутствии самцов предпочитают не заходить на солонец. Значительного отличия по времени суток в посещаемости солонцов самками без телят и самками с телятами не наблюдалось.

В Канаде отмечено пребывание лосей на солонцах в большей части (50%) в период с

17 до 24 ч, далее (40%) с 24 до 7 ч [1]. Следует отметить, что в Канаде, в отличие от Якутии, лоси активно посещают солонцы в светлое время суток. Там самцы регистрировались в утреннее время около 8 ч (21,5%) и в середине дня (33,5%), самки – ранним утром с 5 до 7 ч (28%) на рассвете и поздно вечером с 20 до 24 ч (22%) после заката. Тогда как якутские лоси в утреннее и дневное время редко отмечались на солонце. Возможно, это обусловлено более протяжённым световым днём, так как наши наблюдения проводились на параллели 59°–61° с. ш., где ночи практически «белые»,

а в Канаде (Северная Британская Колумбия) исследованные солонцы находятся чуть южнее – на параллели 54° с. ш., где восход солнца начинается с 5 ч. Также следует отметить, что канадские солонцы находятся на охраняемой территории.

Суточная посещаемость солонца по месяцам представлена в таблице 3. Как видно из данных таблицы, наибольшая активность солонцевания на обоих участках отмечается в июне. Средняя суточная посещаемость солонцов в Южной Якутии составила 5,7, в Центральной Якутии – 2,1. Данное обстоятельство объясняется периодом отёла у самок в конце мая – начале июня и развития пантов у самцов. В других литературных источниках [1, 3] периодом регулярного посещения солонца также в основном указывается конец весны и начало лета. За весь период наблюдений в среднем количество посещений животными за сутки составило: в Южной Якутии – 3,7 (в период с мая по июль), в Центральной Якутии – 1,0 (в период с июня по август).

В посещении солонца в течении летнего периода наблюдаются половые отличия. Солонцевание в мае у обоих полов в Южной Якутии одинаковое. В июне посещение солонца самцами резко увеличивается в Южной Якутии и становится вдвое чаще, чем у самок. Далее в июле, наоборот, активность солонцевания самцов резко падает и становится меньше, чем у самок. В Центральной Якутии такого не наблюдается, в процентном соотношении самцов было больше. По нашим данным в Южной Якутии в общем с июля посещаемость солонца резко снижается – на 82,5% относительно июня, в Центральной Якутии посещаемость снижается не так резко: снижение на 33,4%, что связано с тем, что в июне здесь не отмечалось усиленного посещения солонца самцами, как в Южной Якутии.

Половое соотношение особей, посетивших солонцы, составило: в Центральной Якутии самцы – 60,9%, самки – 39,1%; в Южной Якутии самцы – 45,7%, самки – 54,3%. Процент телят составил: в Южной Якутии – 10,2%, в Центральной Якутии – 30,3%. В Южной Якутии 16 посещений приходится на самок с лосятами, что в процентном соотношении составляет 3,4% от всех посещений, в Центральной Якутии – 24 посещения (соответственно, 11,2%). Хотя в Центральной Якутии в процентном соотношении самок меньше, чем самцов, тем не менее телят больше, что объясняется наличием двух и даже трёх лосят у одной самки.

Выводы

1. Согласно проведённым исследованиям литофагия лосей продолжалась до 132 мин, в среднем составляла 9–12 мин.

2. Самки солонцуют дольше, чем самцы.

3. Продолжительность литофагии лосей в Южной Якутии дольше на 27,5%, чем в Центральной Якутии.

4. В Южной Якутии половина посещений солонца приходится на самое тёмное время суток с полуночи до 4 ч утра (50,5%), а в Центральной Якутии с 20 ч до полуночи (42,5%). В обоих случаях наименьшая посещаемость солонца наблюдалась в светлое время суток с 8 ч до 20 ч (5,6% и 8,6%). В обеих частях ареала самки охотнее, чем самцы, посещают солонец на рассвете с 4 ч до 8 ч утра.

5. Наибольшая активность солонцевания на обоих участках отмечается в июне: в Южной Якутии – 5,7 лосей за сутки, в Центральной Якутии – 2,1 лосей за сутки. Данное обстоятельство объясняется периодом отёла у самок и развития рогов у самцов.

6. За весь период наблюдений в среднем количество посещений за сутки животными составило: в Южной Якутии – 3,7 (в период с мая по июль), в Центральной Якутии – 1,0 (в период с июня по август).

7. В Южной Якутии наблюдалось резкое увеличение посещения солонца самцами в июне и резкое снижение в июле. В Центральной Якутии такая закономерность не отмечалась.

8. Половое соотношение особей, посетивших солонцы в Центральной Якутии, составило: самцы – 60,9%, самки – 39,1%; в Южной Якутии: самцы – 45,7%, самки – 54,3%.

9. Процент телят, посетивших солонец в Южной Якутии, составил 10,2%, в Центральной Якутии – 30,3%.

10. В Южной Якутии на самок с лосятами пришлось 3,4% от всех посещений, в Центральной Якутии – 11,2%.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР № 121020500194-9) и по проекту «Причинно-следственные основы динамики почвенного

покрова и наземных экосистем криолитозоны на территории распространения лёгких пород в Центральной Якутии для разработки фундаментальных основ охраны квазиравновесных криоксерогенных территорий» (тема № 0297-2021-0026, АААА-А21-121012190036-6).

References

1. Filus I.A. Moose behavior at salt licks // *Alces*. 2002. No. 2. P. 49–51.
2. Ayotte J.B., Parker K.L., Arocena J.M., Gillingham M.P. Chemical composition of lick soils: functions of soil ingestion by four ungulate species // *Journal of Mammalogy*. 2006. V. 87. No. 5. P. 878–888. doi: 10.1644/06-MAMM-A-055R1.1
3. Ayotte J.B., Parker K.L., Gillingham M.P. Use of natural licks by four species of ungulates in Northern British Columbia // *Journal of Mammalogy*. 2008. V. 89. No. 4. P. 1041–1050. doi: 10.1644/07-MAMM-A-345.1
4. Rea R.V., Hodder D.P., Child K.N. Year-round activity patterns of moose [*Alces alces*] at a natural mineral lick in North Central British Columbia, Canada // *Canadian Wildlife Biology and Management*. 2013. V. 2. No. 1. P. 36–41.
5. Lavelle M.J., Phillips G.E., Fischer J.W., Burke P.W., Seward N.W., Stahl R.S., Nichols T.A., Wunder B.A., VerCauteren K.C. Mineral licks: motivational factors for visitation and accompanying disease risk at communal use sites of elk and deer // *Environmental Geochemistry and Health*. 2014. V. 36. No. 6. P. 1049–1061. doi: 10.1007/s10653-014-9600-0
6. Heikillä R., Härkönen S. The effects of salt stones on moose browsing in managed forests in Finland // *Alces*. 1998. No. 34. P. 435–444.
7. Bgatov V.I., Panichev A.M., Sobanskiy G.G. Wild salt licks in the mountains of Siberia // *Bulliten MOIP. Otdel biol.* 1988. V. 93. No. 2. P. 42–53 (in Russian).
8. Bgatov V.I., Blagitko E.M., Gavrilova O.A., Masalskaya E.O. Litovit. 4th edition. Novosibirsk: Ekor, 1999. 60 p. (in Russian).
9. Panichev A.M., Golokhvast K.S. The cause and the effect of lithophagial instinct // *Pacific Science Review*. 2011. V. 13. No. 1. P. 64–70.
10. Panichev A.M., Golokhvast K.S., Gulkov A.N., Chekryzhov I.Yu. Geophagy in animals and geology of kudurs (mineral licks): a review of Russian publications // *Environ Geochem Health*. 2013. No. 35. P. 133–152. doi: 10.1007/s10653-012-9464-0
11. Stepanova V.V., Tirskiy D.I., Argunov A.V., Okhlopov A.M. Lithophagy of moose (*Alces alces* L., 1758) in Southern Yakutia // *Agrarnyy Vestnik Urala*. 2018. No. 7. P. 52–57 (in Russian).
12. Stepanova V.V., Argunov A.V., Kirillin R.A., Okhlopov I.M. Time-study of moose (*Alces alces* L., 1758) geophagia activity in the Central Yakutia // *Russian Journal of Theriology*. 2017. No. 2. P. 185–190. doi: 10.15298/rusjtheriol.16.2.07
13. Glushkov V.M., Pankratov A.P. Selective shooting as a tool for managing the moose population // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 2. P. 101–108 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-101-108

Нетрадиционный подход к решению проблемы восстановления нарушенных экосистем на Севере

© 2022. И. А. Лиханова, к. б. н., н. с., Е. Г. Кузнецова, к. б. н., с. н. с.,
Е. М. Лаптева, к. б. н., зав. отделом почвоведения,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Работа посвящена проблеме восстановления нарушенных земель Севера в рамках концепции ускоренного «природовосстановления». В отличие от традиционной рекультивации, направленной на возврат нарушенных земель в хозяйственное пользование, целью «природовосстановления» является восстановление зональных экосистем. Концепция опирается на принцип системности (взаимообусловленности и взаимосвязанности компонентов экосистемы) и представление о самовосстановлении экосистемы как сукцессионном процессе. Состав и структура растительного сообщества служат интегральным показателем состояния экосистемы и её динамического статуса. На основе концепции создана и в дальнейшем доработана двухстадийная система практических приёмов управляемого «природовосстановления», предложена структура технологической карты (схемы) восстановительных работ. В технологической карте предусмотрен научно обоснованный алгоритм восстановления зональных экосистем (или близких к ним) с учётом разного типа нарушений в условиях тундровой и таёжных зон Республики Коми. Разработка карты даёт возможность стандартизировать работы по восстановлению экосистем и избежать ошибок при их проведении. В северных регионах концепция «природовосстановления» и её практическое воплощение являются альтернативой традиционной рекультивации.

Ключевые слова: Север, Республика Коми, нарушенные экосистемы, рекультивация, концепция природовосстановления, технологическая карта.

An unconventional approach to solving the problem of restoring damaged ecosystems in the North

© 2022. I. A. Likhanova ORCID: 0000-0001-8781-4768*
E. G. Kuznetsova ORCID: 0000-0002-9212-4056*
E. M. Lapteva ORCID: 0000-0002-9396-7979*
Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: likhanova@ib.komisc.ru

The work is devoted to the problem of disturbed lands recovering in the north-east of the European part of Russia, where an intensive development of natural resources in recent decades has been made. The specialists of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences have developed the concept of accelerated “nature restoration” taking into account the natural conditions of the northern territories. Nature restoration is a system of similar to zonal ecosystems restoration approaches in the disturbed territories. The concept is based on the system principles (interrelations of the ecosystem components) and the concept of self-recovering ecosystems as succession process. The composition and structure of the plant community are used as an integral indicator of the state and dynamic status of the ecosystem. Based on the concept, we developed two-stage system of practical approaches of controlled “nature restoration”. At the first stage (“intensive”), an artificial ecosystem is created using the agro-technical methods. At the second stage (“assimilation”), the ecosystem is replaced by the zonal type during the managing succession process. Based on the concept and “nature restoration” scheme, we prepared the structure of technological scheme of restoration. It includes a scientifically based algorithm for the restoration of zonal ecosystems (or those close to them), taking into account different types of disturbances in the tundra and taiga zones of the Komi Republic. The scheme consists of three main interrelated sections. Based on the section 1, an accelerated succession scheme is being developed, measures are formulated for the technical and biological stages of the “intensive” stage (Section 2), which

depend on the bioclimatic conditions of the area, the characteristics of soils, the level and degree of their disturbance (pollution), and the regenerative capabilities of the ecosystem. Section 3 includes the monitoring of a restored ecosystem and the managing a succession process in order to fastest inclusion of the post-technogenic ecosystem to the biosphere dynamics. In the northern regions, the concept of “nature restoration” and its practical implementation are an alternative to traditional recultivation.

Keywords: North, Komi Republic, disturbed ecosystems, recultivation, nature restoration concept, technological map.

Рост добычи полезных ископаемых в мире, сопровождаемый увеличением площади нарушенных земель, обуславливает актуальность разработки эффективных приёмов восстановления экосистем на посттехногенных территориях. В настоящее время ведутся многочисленные исследования по созданию технологий, максимально стимулирующих восстановительный процесс, с учётом специфики добывающей промышленности конкретной территории и её природных условий [1–3]. Особого внимания требует проблема восстановления нарушенных земель на Севере [4]. Это объясняется низкой устойчивостью северных биогеоценозов к техногенному воздействию, что определяет быстрое разрушение природных экосистем под влиянием человеческой деятельности. Их низкий самовосстановительный потенциал усиливает негативный эффект промышленного освоения. В связи с выполнением северными экосистемами биосферных функций (продукционные, средозащитные и др.) особенно важной становится задача ускорения восстановления нарушенных территорий. Цель работы – разработать структуру типовой технологической карты для таёжной и тундровой зон северо-востока европейской части России.

Интенсивное освоение минеральных и топливно-энергетических ресурсов в Республике Коми вызывает существенный антропогенный прессинг на таёжные и тундровые экосистемы. Разработка крупных месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, Печорского угольного бассейна, рудных месторождений Тимана и Урала обуславливает наибольшую долю нарушенных земель в городских округах Воркута (южная тундра), Инта, Усинск (южная тундра, предтундровые редколесья, северная тайга), Ухта (северная и средняя тайга), муниципальном районе Печора (северная тайга) (рис.). На территории южных районов воздействие на природные экосистемы связано в основном с активным использованием лесных ресурсов. Разнообразие биоклиматических условий республики и типов нарушений определяет необходимость разработки различных комплексов приёмов восстановления посттехногенных территорий.

Развитие технологий рекультивации нарушенных земель в Республике Коми

Принятие ряда документов, предусматривающих необходимость рекультивации нарушенных земель, в том числе «Основных положений по восстановлению земель, на-

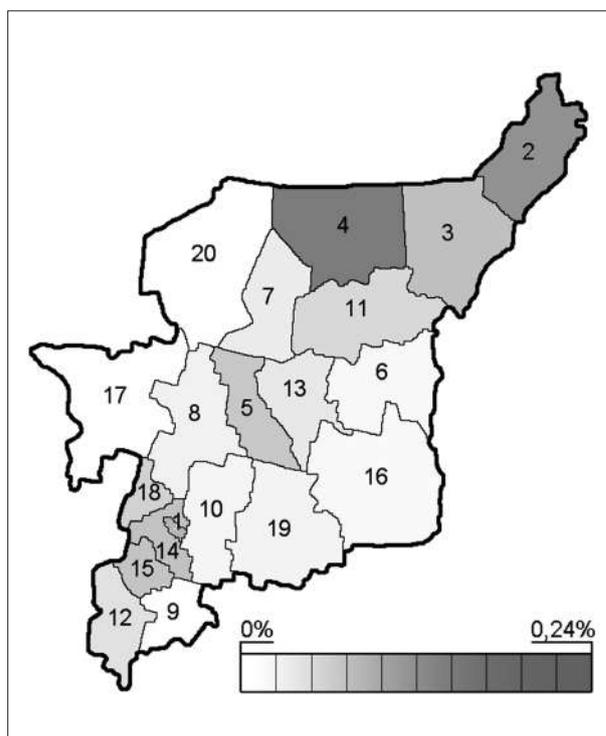


Рис. Доля нарушенных земель в площади муниципальных образований Республики Коми по состоянию на 2018 г. [5]. Городские округа:

1 – Сыктывкар, 2 – Воркута, 3 – Инта,
4 – Усинск, 5 – Ухта, 6 – Вуктыл.

Муниципальные районы: 7 – Ижемский,
8 – Княжпогостский, 9 – Койгородский,
10 – Корткеросский, 11 – Печора,
12 – Прилузский, 13 – Сосногорск,
14 – Сыктывдинский, 15 – Сысольский,
16 – Троицко-Печорский, 17 – Удорский,
18 – Усть-Вымский, 19 – Усть-Куломский,
20 – Усть-Цилемский

Fig. The share of undisturbed lands in the area of municipalities in the Komi Republic according to 2018 [5]. Urban districts: 1 – Syktyvkar, 2 – Vorkuta, 3 – Inta, 4 – Usinsk, 5 – Ukhta, 6 – Vuktyl. Municipal districts: 7 – Izhemsky, 8 – Knyazhpogostsky, 9 – Koygorodsky, 10 – Kortkerossky, 11 – Pechora, 12 – Priluzsky, 13 – Sosnogorsk, 14 – Syktyvdinsky, 15 – Sysolsky, 16 – Troitsko-Pechorsky, 17 – Udorsky, 18 – Ust-Vymsky, 19 – Ust-Kulomsky, 20 – Ust-Tsilemsky

рушенных при разработке месторождений полезных ископаемых, проведении геолого-разведочных, строительных и иных работ», введённых в действие с 1 января 1972 г., послужило толчком для начала систематического учёта нарушенных промышленным воздействием земель в Коми АССР и проведения исследований по проблеме их восстановления.

Попытки использовать на территории Республики Коми принципы и приёмы рекультивации, разработанные для южных районов страны с развитым земледелием и изложенные в государственных стандартах (ГОСТ 17.5.1.01-78, ГОСТ 17.5.3.04-83, ГОСТ 17.5.3.05-84, ГОСТ 17.5.3.06-85), оказались неэффективными, так как они не учитывали специфику почвенных и биоклиматических условий региона. Нуждались в существенном изменении способы улучшения субстрата и ассортимент видов растений для рекультивации.

В 1980-е гг. начались исследования, продолжившиеся в дальнейшем, по подбору многолетних трав, использованию нетрадиционных посевных материалов и агротехнике создания травостоев на нарушенных землях Республики Коми [6–10]. Проводились работы по созданию технологий рекультивации нефтезагрязнённых земель в условиях Севера [11–15], был подготовлен «Регламент по приёме нарушенных и загрязнённых нефтью земель после проведения восстановительных работ» [16]. С 2000 г. начали проводиться исследования по оптимизации процесса восстановления нарушенных лесных экосистем, который заключался в посадке лесных культур с применением одновременно дополнительных приёмов улучшения техногенного субстрата (внесение удобрений, посев трав) [17]. Был предложен ассортимент древесных пород, выявлена целесообразность использования сеянцев и саженцев с комом земли. В целях уменьшения конкуренции между травянистой растительностью и древесными культурами была показана эффективность использования крупномерного посадочного материала при посеве низовых злаков. Установлено, что возвращение на нарушенную территорию подстилочного горизонта ускоряет процесс восстановления биологического разнообразия [18]. В отличие от северных районов в подзоне средней тайги была показана достаточная эффективность посадки древесных растений без улучшения свойств субстрата [19].

Разработка концепции ускоренного «природовосстановления» на Севере

Многолетние комплексные исследования специалистов ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН позволили разработать теоретическую базу восстановления экосистем на Севере – концепцию ускоренного «природовосстановления» [20], декларирующую, что конечной целью работ должно быть восстановление на нарушенных землях экосистем, близких по типу к зональным. Концепция опирается на принцип системности (взаимосвязанности и взаимообусловленности компонентов экосистемы) и представление о самовосстановлении экосистемы как сукцессионном процессе. Интегральным показателем состояния экосистемы являются состав и структура растительного сообщества – чуткие и наглядные индикаторы как степени техногенного воздействия, так и динамического статуса биогеоценоза. Разработаны основные положения методологического подхода [20]. Концепция вписывается в представление об обязательности сохранения ненарушенных природных экосистем в объёме, необходимом для поддержания биосферного равновесия на Земле.

На основе концепции для условий Севера разработана двухстадийная схема практических приёмов управляемого «природовосстановления» [21], которая в настоящее время с получением новых результатов исследований дополняется и дорабатывается. Первая стадия, «интенсивная», включает работы по очистке почв/субстратов (при загрязнении нарушенной территории) и формированию искусственной экосистемы (посев семян местных многолетних трав по фону органических и минеральных удобрений, в лесной зоне – посадка древесных и кустарниковых растений). Этап занимает от 3 до 5 лет, основным критерием его завершения является формирование растительного сообщества с общим проективным покрытием не менее 70%. На второй стадии, «ассимиляционной», сформированная на первой стадии экосистема в ходе сукцессии постепенно преобразуется, замещаясь биогеоценозом, близким к зональному как по структуре и строению, так и по выполняемым функциям [22].

Обоснование разработки технологической карты

Значительное количество прикладных исследований, разработка теоретической базы,

Структура технологической карты (схемы) восстановительных работ
Layout of the technological scheme of recultivation activities

Раздел 1. Основные характеристики состояния посттехногенной территории и выбор направления восстановления нарушенных земель	
Природные условия территории расположения объекта, направление восстановления нарушенных земель	
Природная подзона	Северная тундра / южная тундра / редколесные леса / северная тайга / средняя тайга / южная тайга
Рельеф	Водораздельная равнина, пологие / крутые склоны гряд, холмов, лощина, пойма, терраса рек и т. д.
Почвы	Почвообразующие породы, тип почвы, мощность органогенного горизонта
Растительность	Ерниковые, ивняковые, кустарничковые тундры; леса еловые / сосновые / лиственничные / берёзовые лишайниковые / зеленомошные / долгомошные / сфагновые; бугристые / верховые / переходные / низинные болота и т. п.
Схема самовосстановления растительности (сукцессии) с указанием видов на каждой стадии	Тундровая зона: пионерная стадия → травянистое сообщество → травянистые моховые сообщества с разреженным кустарниковым ярусом → ивняк травянисто-моховой → ерник кустарничково-моховой Таёжная зона: пионерная стадия → травянистое сообщество → лес мелколиственный → лес смешанный → лес тёмнохвойный
Характеристика нарушенной территории	
Тип	Отвал / карьер / дорога / трасса трубопровода и т. п.
Рельеф, размеры территории	Мезо- и микрорельеф, карта-схема (масштаб 1 : 2000 – 1 : 10000) территории
Степень нарушенности почвенно-растительного покрова	Структура почвенно-растительного покрова, карты растительности и почв нарушенных участков и прилегающих к ним ненарушенных территорий
Свойства субстрата/почвы	Физические: гранулометрический состав, влажность, температура и т. д.; химические: рН, содержание углерода, азота, калия, кальция, магния, фосфора и т. д.
Загрязнение субстрата/почвы	Загрязнение (есть/нет), характер загрязнения (нефтью / пластовыми водами / тяжёлыми металлами и т. п.), концентрация загрязнителей
Пригодность субстрата к восстановлению	Оценка пригодности, выбор мер по улучшению свойств субстрата
Направление восстановления нарушенных земель	Природовосстановление – формирование зонального или близкому к нему типа экосистемы
Разработка опорной схемы управляемой сукцессии	Описание приёмов создания искусственных экосистем, сукцессионных рядов и приёмов управления восстановительной сукцессией
Раздел 2. Организация и технология работ «интенсивной» стадии схемы практических приёмов «природовосстановления»	
Технический этап	
Формирование рельефа	Планировка, формирование неоднородности рельефа (микрорельефа)
Улучшение свойств субстрата	Очистка от загрязнений, использование потенциально плодородных вскрышных пород, внесение минеральных и органических удобрений
Биологический этап	
Формирование биотического компонента экосистемы	Посадка саженцев / семян / черенков кустарниковых и древесных растений, посев семян местных / районированных видов трав, использование лесной подстилки
Уход за формирующейся экосистемой	Подкормки, дополнение посадок, подсев семян растений, контроль и предупреждение эрозионных процессов
Обследование территории для оценки состояния почв и растительности	Геоботанические описания, отбор образцов почвы для химических анализов

Составление и утверждение акта приёма и сдачи восстанавливаемой территории	На основании критериев оценки эффективности восстановительных работ: содержание загрязнителей, характеристика растительного покрова, почв, интенсивность эрозии, показатели гидрологического и температурного режимов
Раздел 3. Организация и технология работ «ассимиляционной» стадии схемы практических приёмов «природовосстановления»	
Контроль состояния восстанавливаемой территории	Ежегодный мониторинг растительности и почв, гидрологического и термического режимов, слежение за соответствием восстановительного процесса схеме управляемой сукцессии
Управление сукцессионным процессом для стимулирования желаемого направления	Уход за лесными культурами, подсев семян трав, приёмы увеличения видового разнообразия, устранение последствий эрозионных процессов и др.

публикация ряда рекомендаций, технологий и регламентов обусловили существенное улучшение качества восстановительных работ, проводимых на территории нарушенных земель Республики Коми. Однако отсутствие разработанного и утверждённого руководства, включающего стандартизованные схемы (технологические карты) восстановительных мероприятий для различных биоклиматических зон и подзон республики, с учётом исходных ландшафтных и экотопических условий техногенных местообитаний, определяет значительное количество ошибок и недочётов при проведении работ по восстановлению посттехногенных территорий.

Нами разработана структура технологической карты восстановительных работ (своего рода шаблон), базирующейся на принципах концепции «природовосстановления» (табл.). В предлагаемой карте предусмотрен научно обоснованный алгоритм восстановления зональных экосистем (или близких к ним) на нарушенных землях разного типа в условиях тундровой или таёжной зон.

Технологическая карта включает три основных и взаимосвязанных раздела (табл.). На основании данных раздела 1 производится разработка схемы ускоренной сукцессии, формулируются мероприятия технического и биологического этапов «интенсивной» стадии (раздел 2), которые напрямую зависят от биоклиматических условий местности, характеристики почв, уровня и степени их нарушений (загрязнений), регенеративных возможностей экосистемы. Раздел 3 предусматривает мониторинг состояния восстанавливаемой экосистемы и управление сукцессионным процессом для максимально быстрого включения посттехногенного биогеоценоза в биосферные процессы.

Одним из основных компонентов технологической карты является опорная схема

управляемой сукцессии. Её разработка должна основываться на понимании особенностей самовосстановления природных биогеоценозов и их функционирования. Изучение закономерностей сукцессий на антропогенно нарушенных территориях Республики Коми [23–26] будет способствовать не только разработке схем управляемой сукцессии, подбору ассортимента видов травянистых, кустарниковых и древесных растений для создания искусственных экосистем, но и возможности использования растений-индикаторов для оценки этапности и направленности сукцессионного процесса.

Заключение

Нетрадиционный подход к решению проблемы восстановления нарушенных экосистем на Севере позволил создать базирующуюся на принципах концепции «природовосстановления» технологическую карту, структура которой предусматривает различные варианты приёмов восстановления в разных природных зонах с учётом исходных характеристик посттехногенной территории. Это даёт возможность стандартизировать работы по восстановлению экосистем и избежать ошибок при их проведении.

Разработанная для северных регионов концепция «природовосстановления», её практическое воплощение служат альтернативой рекультивации и могут быть применены с определённой корректировкой и для других географических условий.

Нарушение биогеоценозов в процессе освоения природных ресурсов должно уравновешиваться адекватным восстановлением природных экосистем, т. е. «природовосстановление» является важнейшим компонентом общей системы природопользования.

Работа выполнена в рамках темы НИР отдела почвоведения на 2022–2024 гг. «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв арктических и бореальных экосистем европейского Северо-Востока в условиях современных антропогенных воздействий, глобальных и региональных климатических трендов», регистрационный номер: 122040600023-8.

References

- Zipper C.E., Burger J.A., Skousen J.G., Angel P.N., Barton C.D., Davis V., Franklin J.A. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines // *Environmental Management*. 2011. No. 47. P. 751–765. doi: 10.1007/s11056-015-9502-8
- Macdonald S.E., Landhausser S.M., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D.F., Quideau S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions // *New Forests*. 2015. V. 46. No. 5. P. 703–732. doi: 10.1007/s11056-015-9506-4
- Legwaila I.A., Lange E., Cripps J. Quarry reclamation in England: a review of techniques // *Journal American Society of Mining and Reclamation*. 2015. V. 4. No. 2. P. 55–79. doi: 10.21000/JASMR15020055
- Minaeva T.Yu., Avetov N.A., Golubeva S.G., Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V., Lobanova E.A., Mizin I.A., Novikov S.M., Popov A.I., Sirin A.A., Usova L.I., Shishkonakova E.A. Ecological restoration in arctic: review of the international and russian practices. Syktyvkar–Naryan-Mar, 2016. 288 p. (in Russian).
- State report “On the state of the environment of the Komi Republic in 2019”. Syktyvkar: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Komi Republic, Territorial Information Fund of the Komi Republic, 2020. 162 p. (in Russian).
- Akulshina N.P., Lobovikov N.N., Mengalimov H.Ya. The experience of phytomelioration of eroded soils on the route of the Vosey-Usa-Ukhta main oil pipeline // *Rastitel'nye Resursy*. 1981. V. XVII. No. 2. P. 175–183 (in Russian).
- Akulshina N.P. The ecological role of vegetation in environmental protection during the construction and operation of pipelines // *Main pipelines of chilled and liquefied gas*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Academy Sciences of the USSR, 1988. P. 136–152 (in Russian).
- The impact of the development of placer deposits in the Subpolar Urals on the natural environment. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1994. 167 p. (in Russian).
- Degteva S.V., Simonov G.A. Land reclamation in the North. No. 2. Phyto-reclamation of waste placer dumps in the Subpolar Urals. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1995. 40 p. (in Russian).
- Land restoration in the Far North. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, 2000. 152 p. (in Russian).
- Environmental protection during exploration, production and transportation of hydrocarbons. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, 1989. 124 p. (in Russian).
- Chalysheva L.V., Gladkov V.P., Gardievskaya Z.G. Natural overgrowth of oil-contaminated lands and the experience of their reclamation in the North // *Ecological and economic aspects of nature management in the European North-East*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, 1990. P. 74–82 (in Russian).
- Land recultivation in the North. No. 1. Recommendations for land reclamation in the Far North. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. 34 p. (in Russian).
- Requirements for technologies for remediation of oil-contaminated lands in the North. Syktyvkar: Komimeliiovodkhozproekt, 2004. 134 p. (in Russian).
- Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Lapteva E.M., Vasilevich R.S., Markarova M.Y., Glazacheva E.N., Uspenskaya M.V. Modeling of the “contour water flooding” technology in microcosms // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53. No. 2. P. 230–239. doi: 10.1134/S1064229320020118
- Regulations for the acceptance of disturbed and oil-contaminated lands after restoration work. Syktyvkar: Komimeliiovodkhozproekt, 2012. 30 p. (in Russian).
- Likhanova I.A., Archegova I.B., Khabibullina F.M. Restoration of forest ecosystems in anthropogenically disturbed territories of the extreme northern taiga subzone of the European northeast of Russia. Yekaterinburg: UBRAS, 2006. 103 p. (in Russian).
- Likhanova I.A., Kovaleva V.A. Possibilities of simultaneous seeding of meadow grasses and wooden plants for remediation of disturbed lands in north of taiga domain in Komi Republic // *Lesovedenie*. 2018. No. 6. P. 444–453 (in Russian). doi: 10.1134/S0024114818060050
- Likhanova I.A., Kuznetsova Ye.G., Novakovskiy A.B. Vegetative cover forming in quarries after forest recultivation being performed in middle taiga subzone of the north-east of the European Russia // *Lesovedenie*. 2020. No. 5. P. 424–432 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114820050095
- Archegova I.B. An effective system of nature restoration is the basis for promising nature management in the Far North. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 12 p. (in Russian).
- Likhanova I.A., Archegova I.B. Development of theoretical and practical aspects of disturbed lands restoration in the North of the Komi Republic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 3. P. 79–85 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-079-085

22. Environmental principles of nature management and nature restoration in the North. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 176 p. (in Russian).

23. Druzhinina O.A., Myalo E.G. Protection of vegetation cover of the far North: problems and prospects. Moskva: Agropromizdat, 1990. 176 p. (in Russian).

24. Sumina O.I. Formation of vegetation in technogenic habitats of the Far North of Russia. Sankt-Peterburg: Inform-Navigator, 2013. 340 p. (in Russian).

25. Likhanova I.A., Shushpannikova G.S., Turubanova L.P. Vegetation on technogenic habitats in the far-north

taiga and south forest-tundra of the European North-East of Russia. Alliance *Chamerio angustifolii*-*Matricarion hookeri* A. Ishbirdin et al. 1996 // *Vegetation of Russia*. 2019. No. 35. P. 77–94 (in Russian). doi: 10.31111/veg-rus/2019.35.77

26. Likhanova I.A., Shushpannikova G.S., Zheleznova G.V., Pystina T.N. Syntaxonomy of plant communities at the quarries after the cuttings of lichen and green moss pine forests (middle taiga subzone of the European North-East of Russia) // *Rastitel'nost' Rossii*. 2020. No. 39. P. 3–25 (in Russian). doi: 10.31111/veg-rus/2020.39.3

Динамика растительности фитомелиорированного очага дефляции на территории Республики Калмыкия

© 2022. Л. П. Рыбашлыкова, к. с.-х. н., в. н. с.,
Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН,
400062, Россия, г. Волгоград, пр-т Университетский, д. 97,
e-mail: ludda4ka@mail.ru

Изучены состояние растительного покрова и состав растительных сообществ восстановленного фитомелиорированного очага дефляции. Лесомелиоративное обустройство очага дефляции «Зелёная зона п. Комсомольский» проведено в 1998 г. в деструктивно-аккумулятивной зоне способом сплошной посадки джужгуна безлистного (*Calligonum aphyllum* (Pall.) Gurke) без предварительной подготовки почвы с помощью лесопосадочной машины МЛБ-1, оборудованной дерноснами. В настоящее время в растительном покрове нижнего травяного яруса (возраст 20–23 года) преобладают разнотравно-злаковые и белопопынно-злаковые сообщества с проективным покрытием 65%. Видовой состав стабилизировался к 10–15 годам и насчитывает около 30 видов. Под защитой джужгуновых насаждений за 18–20-летний период сукцессий происходит формирование и стабилизация фитоценозов, созданы условия для внедрения видов, произрастание которых требовало определённого уровня плодородия почвы, более комфортного микроклимата, чем на деградированных почвах и открытых песках. С увеличением продолжительности сукцессий отмечены изменения в экобиоморфном составе фитоценозов, снижение доли однолетних видов, увеличение численности разнотравья. Установлено, что чрезмерный выпас и пирогенный фактор сдерживают прогрессивные сукцессии растительного покрова участка. Под воздействием перевыпаса в видовом составе в конкурентной среде виды примерно в равном соотношении замещаются другими видами. Происходит снижение кормовой ценности фитоценозов с развитием монокультур (малоценных видов растений). Полученные данные о флоре, численности, структуре растительного покрова демонстрируют современное состояние в «потухших» очагах дефляции на пастбищах Республики Калмыкия.

Ключевые слова: аридная зона, деградация земель, фитомелиорация, сукцессии, растительные сообщества.

Dynamics of vegetation of the phytomeliorated deflation zone on the territory of the Republic of Kalmykia

© 2022. L. P. Rybashlykova ^{ORCID: 0000-0002-3675-6243}
Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Meliorations
and Protective Aforestation of Russian Academy of Sciences,
97, Universitetsky Prospekt, Volgograd, Russia, 400062,
e-mail: ludda4ka@mail.ru

The state-of-the-art of the vegetation cover and plant communities composition of the restored phytomeliorated deflation zone has been studied. Forest reclamation arrangement of the “Green zone – Komsomol’skiy village” deflation zone was carried out in 1998 in a destructive-accumulative zone by continuous planting of *Calligonum aphyllum* without preliminary soil preparation. Tree-planting machine MLB-1 was used for these purposes. Forb-cereal and white wormwood-cereal communities with a projective cover of 65% is currently dominated in the vegetation cover of the lower grassy tier (age is 20–23 years). The species composition has stabilized to 10–15 years. About 30 species have been included in the species composition. The formation and stabilization of phytocenosis occurs under the protection of *Calligonum aphyllum* planting for 18–20-years period of succession. Conditions for the introduction of species, the growth of which required a certain level of soil fertility, as well as more comfortable microclimate than on degraded soils and open sands, have been created in the same period. There are changes in the ecobiomorphic composition of phytocenosis, a decrease in the share of annual species, an increase in the number of forbs with an increasing in the duration of successions. It was found that progressive successions of the site vegetation cover inhibit by overgrazing and pyrogenic factor. Under the influence of overgrazing in the species composition in a competitive environment, species are replaced by other species in approximately equal relation. There is a decrease in the feed value of phytocenoses with the development of monocultures (low-value plant species) The obtained data on the flora, abundance, and structure of vegetation cover demonstrate the current state in the “exhausted” centers of deflation in the pastures of the Republic of Kalmykia.

Keywords: arid zone, land degradation, phytomelioration, succession, plant community.

Растительные ресурсы имеют важнейшее значение для устойчивого развития пастбищных территорий, в том числе для развития животноводства в районах с аридным климатом. Растительность находится в тесной взаимосвязи с природными условиями и хозяйственным использованием территории [1–4]. Пастбища Республики Калмыкия используются круглогодично. Нерациональное использование земель, чрезмерные антропогенные нагрузки, превышающие порог устойчивости природных экосистем, приводят к деградации растительного покрова и деградации [5]. Процессы антропогенного опустынивания (1970–1980 гг.) охватили большие территории Республики Калмыкия, следствием чего стало нарушение экологического равновесия, обеднение видового и популяционного разнообразия природных экосистем. Однако благодаря принятым мерам и проведённым фитомелиоративным мероприятиям было остановлено лавинообразное опустынивание [6–9]. В настоящее время антропогенное воздействие на пастбищные экосистемы вновь усилилось и требует всё большего внимания к проблеме сохранения и восстановления природных биоресурсов. В числе актуальных направлений остаётся изучение динамики восстановления растительного покрова и профилактика его деградации.

Проведение исследований флористического состава и особенностей формирования естественной растительности является научной основой для решения задач по охране и воспроизводству кормовых ресурсов, разработке эффективных методов экологической реставрации нарушенных пастбищных экосистем.

Цель исследований – оценить характер динамики растительности пастбищных фитоценозов в фитомелиорированном очаге дефляции «Зелёная зона п. Комсомольский» за 20-летний период.

Исследования особенностей динамики растительности после проведённой фитомелиорации и стабилизации рельефа позволяют оценить характер и скорость восстановительных процессов, научно обосновать рекомендации по коррекции пастбищной нагрузки.

Объекты и методы исследования

В основу исследований положены материалы многолетнего биомониторинга фитомелиорированного очага дефляции. Объект исследований – восстановленный 20 лет назад крупный очаг дефляции («Зелёная зона

п. Комсомольский») и прилегающие к нему природные пастбищные экосистемы.

Район исследования расположен в Прикаспийской низменности на территории Южно-Черноземельской песчаной равнины. Согласно ландшафтно-географическому районированию Калмыкии исследуемая территория относится к южной части района «Чёрные земли» с координатами 45°19,758'N, 46°03,871'E.

Массив дефляционного опустынивания «Зелёная зона п. Комсомольский» площадью свыше 600 га образовался на бурых солонцеватых почвах и по состоянию почвенного и растительного покрова относился к I-й лесомелиоративной категории (ЛМК) пастбищ, как территория со среднебарханскими песками и сильноразвееваемыми почвами, преимущественно песчаного механического состава. Фитомелиоративное освоение массива опустынивания проводилось в 1998 г. закреплением открытых песков кустарником *Calligonum aphyllum*. В 2003 г. в микропонижения посадки *C. aphyllum* (возраст 6 лет) усилиями Калмыцкой НИАГЛОС заложен древесный ярус, посажены вручную под лопату саженцы 2-х летнего возраста *Ulmus pumila* L.

Исследуемая территория «потухшего» очага дефляции по ботанико-географическому районированию входит в зону типичных ксерофитно-полукустарничковых пустынь Прикаспийской подпровинции Северотуранской провинции Афро-азиатской пустынной области.

Геоэкологический режим территории контролируется резко континентальным климатом: лето жаркое и очень сухое; зима мало-снежная и холодная. Амплитуда колебаний абсолютных температур воздуха в течение года достигает 80–85 °С. Режиму атмосферного увлажнения присущи незначительное количество атмосферных осадков, крайняя погодичная неустойчивость их суммы и неравномерность выпадения в течение года. По данным метеостанции п. Комсомольский, в среднем за год выпадает 190–250 мм осадков, за тёплый период (апрель – октябрь) – 100–150 мм. Самый жаркий месяц – июль, самый холодный – январь (табл. 1).

Для решения поставленной цели использовали комплекс методов, включающих полевые геоботанические описания на модельных территориях в соответствии с общепринятыми методиками. Геоботанические описания растительности проводили на 5 пробных площадях размером 100 м², внутри которых описыва-

Климатические показатели за 2014–2019 годы исследования
Climatic data during the study years

Год Year		2014	2015	2016	2017	2018	2019	Среднее ± стандартное отклонение Average ± standard deviation
Осадки (мм) Rainfall (mm)	холодный период cold period	70	67	141	88	81,2	54,2	84±25
	тёплый период warm period	179	139	180,6	109	109,4	196,5	152±14
	за год / for a year	249	206	321,6	197	190,6	250,7	236±50
Температура (°C) Temperature (°C)	холодный период cold period	1,4	1,0	2,9	0,3	1,5	2,2	1,5±0,2
	тёплый период warm period	20,3	19,7	20,0	20,0	20,6	20,2	20,1±0,9
	за год / for a year	12,4	11,9	12,9	11,8	12,7	12,7	12,4±1,2

ли по 10 учётных площадок размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ в различные сезоны года. Описание травянистой растительности включало: определение видовой принадлежности, возрастные особенности (ювенильные, генеративные, сенильные особи), степень проективного покрытия (ПП), название фитоценоза, особенности почвенного покрова [10]. При выделении жизненных форм использовали систему Раункиера, учёт обилия видов проводили по шкале О. Друдэ, экологические типы растений определяли по Т.К. Горышиной. Продуктивность растительных сообществ определяли укосным методом на пробных площадках размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ в трёхкратной повторности. Срезанную на высоте 1–2 см от почвы фитомассу взвешивали в сыром и воздушно-сухом состоянии. Для анализа биоразнообразия применяли кривые доминирования-разнообразия. Математическую обработку полученных данных проводили с использованием компьютерных программ Microsoft Excel XP, STATISTICA. Номенклатура видов приведена по [11].

Результаты и обсуждение

Искусственно созданные агромелиоративные фитоценозы лесопастбища характеризуются стабильными показателями жизненного состояния, биометрических параметров, ПП и способностью к самовозобновлению, которые все вместе определяют условия произрастания и дальнейшую агромелиоративную роль в меняющихся погодных условиях «Чёрных земель». После фитолесомелиорации и стабилизации рельефа очаги дефляции начинают

зарастать с первого же года. Динамика растительного покрова в мелиорированных очагах дефляции в последующие годы определяется в основном режимом их пастбищного использования. Десятилетние сукцессионные изменения находятся на стадии рудеральных простых группировок, 70% фитомассы образовано однолетними сорными растениями, многолетних видов в 2,5 раза меньше – 28,2%. В составе экологических групп преобладают кормовые растения – 48,7%, лекарственные и ядовитые представлены 5,1 и 7,7% видов соответственно. Доли растений категории рудеральных остаются всё ещё высокими – 23,1% видов. Из рудеральных растений самыми распространёнными являются: *Centaurea diffusa*, *Sisymbrium loeselii*, *Salsola tragus*, *Suaeda altissima*, *Descurainia sophia*, реже – *Lappula squarrosa*, *Xanthium spinosum*. Ядовитые растения представлены *Euphorbia chamaesyce*, которого особенно много, *Heliotropium suaveolens*, *Delphinium consolida*. Ежегодный мониторинг флоры позволил выявить не только видовой состав, но и погодичные изменения. В последующие десятилетия на лесопастбище сукцессионные изменения носят прогрессивный характер, флористический состав расширяется до 30–50 видов. Почвенный покров стабилизирован, появляются как многолетние кормовые растения (*Puccinellia distans*, *Elitrigia repens*, *Artemisia lerchiana*, *Galium aparine*), так и однолетние (*Eragrostis minor*, *Carex stenophylla*, *Ceratocarpus arenarius*), а также разнотравье (*Achillea micrantha*, *Erodium cicutarium*, *Nonea caspica*, *Filago arvensis* и др.). Ведущими семействами являются Asteraceae – 10 видов (25,6%),

Таблица 2 / Table 2

Видовой состав сообществ на модельных площадках фитомелиорированного участка в 2014–2019 гг.
List of species names found in the studied field in 2014–2019

Вид Species	Семейство Family	Жизненная форма по К. Раункьеру Raunkiaer life form	A/P/C
<i>Achillea micrantha</i> Willd.	Asteraceae	H	P
<i>Alyssum desertorum</i> Stapf	Brassicaceae	Th	A
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	Amaranthaceae	Th	A
<i>Anisantha tectorum</i> (L.) Nevski	Poaceae	Th	A
<i>Artemisia lercheana</i> Weber ex Stechm.	Asteraceae	H	P
<i>Atriplex tatarica</i> L.	Chenopodiaceae	Th	A
<i>Avena strigosa</i> Schreb.	Poaceae	Th	A
<i>Bassia scoparia</i> (L.) A.J. Scott	Chenopodiaceae	Th	A
<i>Calligonum aphyllum</i> (Pall.) Gürke	Polygonaceae	Ph	P/C
<i>Carduus uncinatus</i> M. Bieb.	Asteraceae	H	P
<i>Carex stenophylla</i> Wahlenb.	Cyperaceae	Kr	P
<i>Centaurea diffusa</i> Lam.	Asteraceae	Th	P
<i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	Chenopodiaceae	Th	A
<i>Consolida regalis</i> Gray	Ranunculaceae	Th	A
<i>Crepis tectorum</i> L.	Asteraceae	Th	A
<i>Descurainia sophia</i> (L.) Webb ex Prantl	Brassicaceae	Th	A
<i>Elytrigia intermedia</i> (Host) Nevski	Poaceae	Kr	P
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	Poaceae	Kr	P
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Her. ex Aiton	Geraniaceae	Th	A
<i>Euphorbia chamaesyce</i> L.	Euphorbiaceae	Th	A
<i>Filago arvensis</i> L.	Asteraceae	Th	A
<i>Galium aparine</i> L.	Rubiaceae	Th	A
<i>Galium humifusum</i> M. Bieb.	Rubiaceae	H	P
<i>Heliotropium suaveolens</i> M. Bieb.	Boraginaceae	Th	A
<i>Koeleria macrantha</i> (Ledeb.) Schult.	Poaceae	H	P
<i>Lactuca serriola</i> L.	Asteraceae	H	A
<i>Lappula squarrosa</i> (Retz.) Dumort.	Boraginaceae	H	P
<i>Lepidium campestre</i> (L.) R. Br.	Brassicaceae	Th	A
<i>Nonea caspica</i> (Willd.) G. Don	Boraginaceae	Th	A
<i>Onopordum acanthium</i> L.	Asteraceae	H	P
<i>Polygonum patulum</i> M. Bieb.	Polygonaceae	Th	A
<i>Puccinellia distans</i> (Jacq.) Parl.	Poaceae	H	P
<i>Salsola tragus</i> L.	Chenopodiaceae	Th	A
<i>Sisymbrium loeselii</i> L.	Brassicaceae	H/Th	A
<i>Suaeda altissima</i> (L.) Pall.	Chenopodiaceae	Th	A
<i>Tragopogon major</i> Jacq.	Asteraceae	H	P
<i>Trigonella orthoceras</i> Kar. & Kir.	Fabaceae	Th	A
<i>Ulmus pumila</i> L.	Ulmaceae	Ph	P/C
<i>Xanthium spinosum</i> L.	Asteraceae	Th	A
Всего / Total			
39	14	Th : 23; Ph : 2 H : 10; Cr : 3	A : 24 P : 13 P/C : 2

Примечание: Th – терофиты, Ph – фанерофиты, H – хамефиты, Cr – криптофиты; A/P/C – однолетние/многолетние/культивируемые.

Note: Th – therophytes, Ph – phanerophytes, H – hamefits, Cr – cryptophytes; A/P/C – annual/perennial/cultivated.

Роасеae – 6 видов (15,4%) Chenopodiaceae – 5 видов (12,8%) (табл. 2).

Представители других семейств флоры представлены 1–2 видами, но все они играют несомненную роль в восстановлении растительного покрова. Малый спектр семейств с небольшим числом видов подтверждает нарушение флоры антропогенным и пирогенным факторами. В основной состав сообществ входят виды с евразийским (80%) типом ареала. Восстановленный растительный покров сформирован преимущественно терофитами (58,9%). С увеличением продолжительности сукцессии и умеренного выпаса доля терофитов снижается на 24,7%, гемикриптофитов и хамефитов увеличивается на 6–10%.

Кустарниковый ярус представлен только *Calligonum aphyllum* (Pall.). *Calligonum* способен использовать почвенную влагу, недоступную для травянистых растений на всех категориях и типах пастбищ с деградированным растительным покровом. Его применение при фитомелиорации оголенных ветроударных участков позволяет получить защитные лесопосадки высотой 1,0–1,5 м и до 5 ц/га сухой фитомассы. Обследование насаждений *Calligonum* показало его отличное состояние: плодоношение – 100%, суховершинных – не более 5%, высота – от 1,7 до 2,2 м, диаметр кроны за счёт поросли достигает 4 м, в среднем составляет 2,0–2,5 м. Отмечено много самосева и поросли (корневых отпрысков), местами по 5–7 штук на 10 м², высота поросли 30–50 см, в среднем – 40 см. Данное насаждение используется не только для отдыха животных, но и активно используется как пастбище, особенно при неорганизованной пастьбе крупного рогатого скота из личных хозяйств местных жителей. Посадки вяза при обследовании в 2017 г. находились в сильно ослабленном состоянии (3,2 балла). Средняя высота достигала 4,7 м с шириной кроны – 4,2 м и средним диаметром ствола на высоте 1,3 м – 8,5 см. К моменту обследования в 2019 г. древесный ярус из вяза приземистого выпал на 80% по причине воздействия интенсивного пожара. В растительном покрове нижнего травяного яруса пастбища преобладали разнотравно-злаковые комплексы. Распространены также белопопынно-злаковые ассоциации (*Anisantha tectorum* – *Artemisia lerchiana*), в понижениях разнотравно-бескильницевые (*Puccinellia distans* – *Centaurea diffusa*), разнотравно-попынные (*Artemisia lerchiana* – *Centaurea diffusa*, *Alyssum desertorum* и др.) и бескильницево-пырейные раститель-

ные сообщества. Под защитой джужгуна ближе к кустам или под ними встречаются *Galium humifusum*, *Polygonum patulum*, *Delphinium*. Из разнотравья обычны *Tragopogon dubius*, *Carduus uncinatus*, *Filago arvensis*, реже – куртинки *Achillea micrantha*, *Erodium cicutarium*, единично – *Nonea caspica* [12]. Полынь белая постепенно перемещается от края участка, где встречается куртинками от 1 до 2–3 м², дальше вглубь участка, где произрастает единично крупными кустами. Наблюдения показывают, что однократное воздействие пожара и чрезмерный выпас способствуют замедлению прогрессивной сукцессии растительного покрова, в результате однолетние эфемеры начинают доминировать в травостое. Пирогенное воздействие прошлых лет привело к возрастанию в общем фоне лесопастбища однолетнего злака-эфемера – *Anisantha tectorum*. Проективное покрытие яруса травянистой растительности лесопастбища «Зелёная зона п. Комсомольский» варьирует от 30 до 60% в зависимости от почвенных разностей. Среднепогодное и усреднённое ПП по фитомелиорированному участку составляет 65%. Ранговое распределение видов в весенний период соответствует логарифмической модели. Форма кривой доминирования-разнообразия в летний период приближается к геометрическому распределению (доминируют немногие виды при небольшой численности), а в осенний период близка к логнормальному распределению (большинство видов имеет среднее обилие, доминирующих мало) (рис. 1).

Результаты исследований продуктивности растительных сообществ показывают, что наибольшие запасы фитомассы естественной растительности формируются в приземном слое 0–15 см и составляют 64–67% от среднепогодной урожайности пробных площадок при средней высоте растений до 45 см (рис. 2).

Заключение

За 20-летний период на восстановленной территории произошли значительные изменения структуры растительного покрова. Установлено, что зарастание очага дефляции протекает по типу вторичной сукцессии, направленной на постепенное увеличение видового биоразнообразия. Видовой состав развивается по разнотравно-злаковому типу, в основном стабилизируется к 10–15 годам и насчитывает около 30 видов. К 20–25 годам он пополняется ещё 15 видами, достигая ПП 65%. Флористический состав фитомелиори-

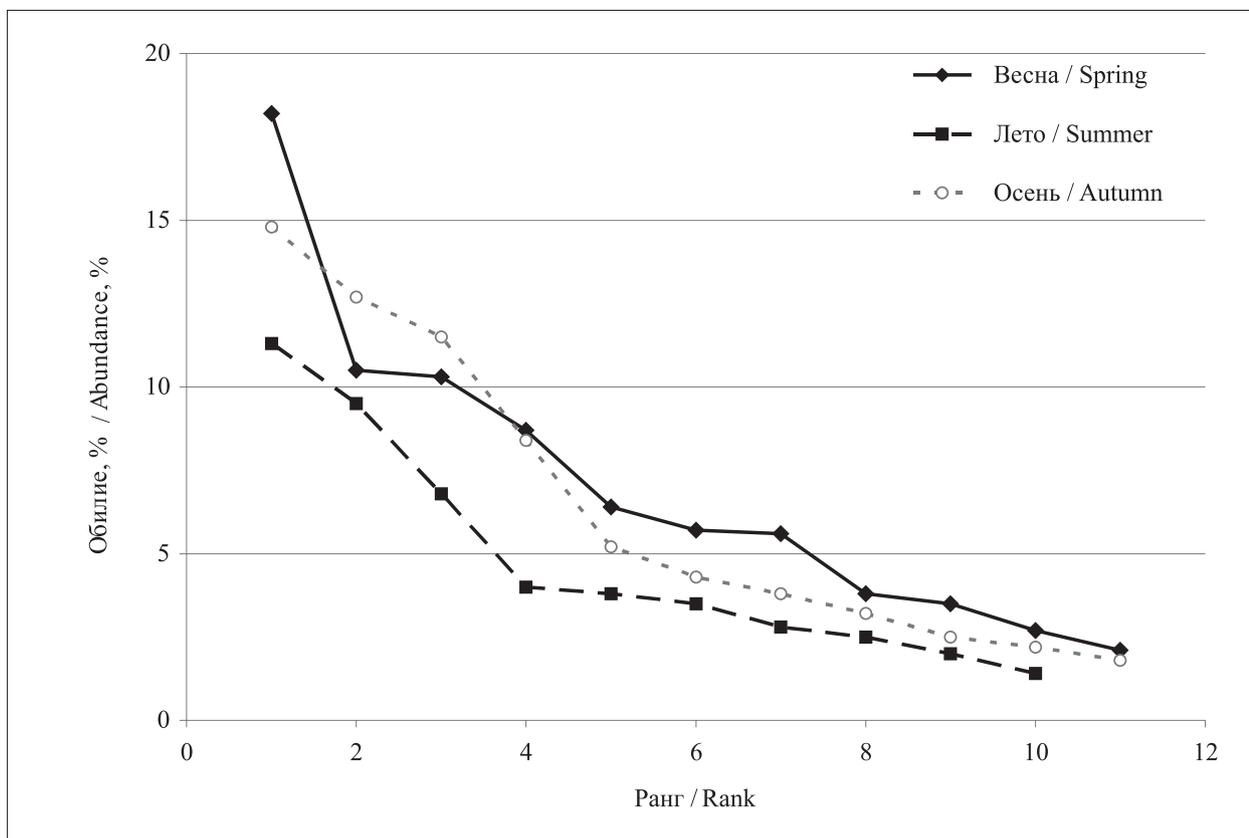


Рис. 1. Кривые доминирования-разнообразия в зависимости от времени года и продолжительности сукцессии

Fig. 1. Domination-diversity curves depending on the time of year and duration of succession

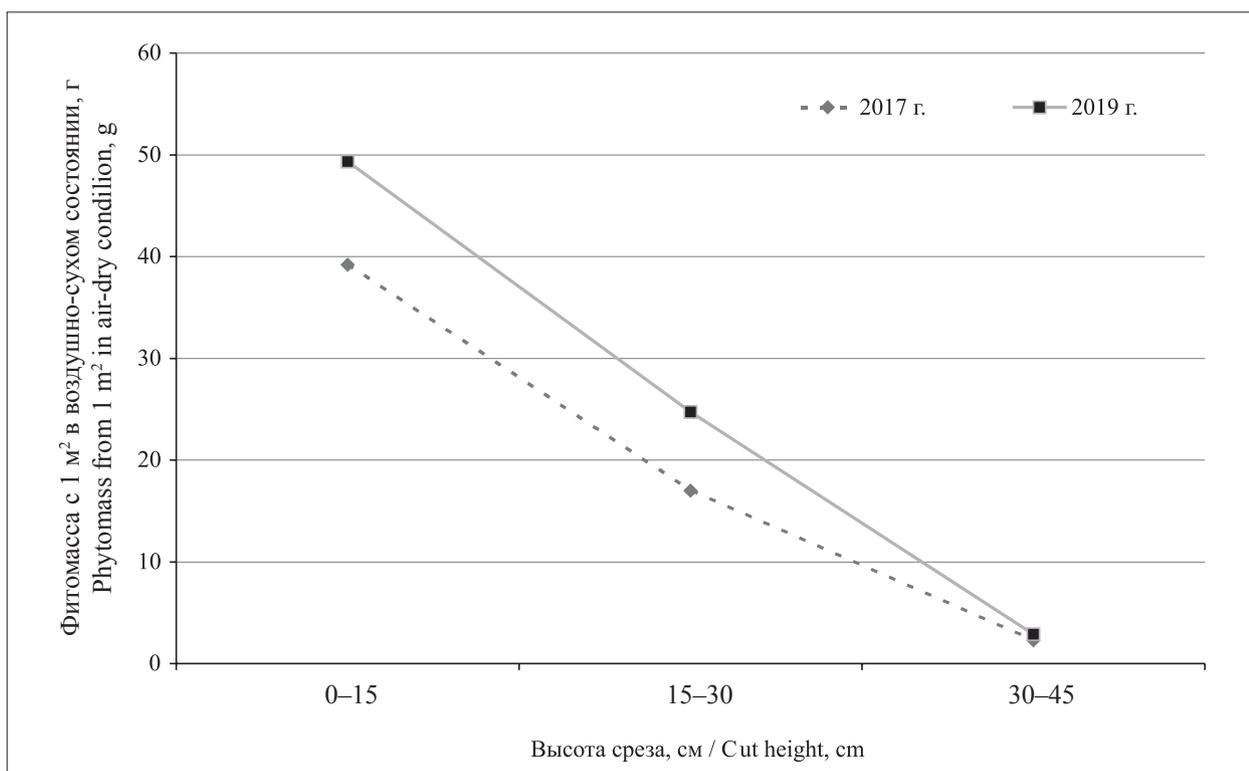


Рис. 2. Урожайность и особенности формирования фитомассы растительности

Fig. 2. The yield and characteristics of the formation of vegetation phytomass

рованного участка становится более разнообразным, чем на прилегающих территориях, включает 13 постоянных многолетних вида, обеспечивающих относительную устойчивость экосистем в условиях изменения среды. Однолетняя растительность значительно подвержена сезонным флуктуациям, носящим циклический характер в связи с изменениями температурного режима и влажности. Под защитой джужгуновых насаждений формируются участки обсеменения растений. Фитоценозы, сформированные за 20 и более лет, способны к самоподдержанию и саморегулированию и даже при отсутствии стабильного атмосферного увлажнения сохраняют достаточный уровень жизнеспособности.

Основными причинами, способствующими замедлению прогрессивной сукцессии растительного покрова, являются антропогенные и пирогенные факторы, оказывающие доминирующее влияние на состояние и динамику растительности.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122020100309-0 «Теоретические основы, базовые принципы и технологии повышения эффективности защитного лесоразведения и комплексной фитомелиорации на деградированных, нарушенных и низкопродуктивных землях засушливой зоны России».

References

1. Manaenkov A.S. Forest reclamation of dry zone arenas. 2nd edition revised and corrected. Volgograd: VNIALMI, 2018. 428 p. (in Russian).
2. Djanibekov U., Khamzina A., Djanibekov N., Lamers J.P.A. How attractive are short-term CDM forestations in arid regions? The case of irrigated croplands in Uzbekistan // Forest Policy and Economics. 2012. V. 21. P. 108–117.
3. Economics of land degradation and improvement – a global assessment for sustainable development / Eds. E. Nkonya, A. Mirzabaev, J. von Braun. Springer International Publishing AG Switzerland, 2016. 686 p. doi: 10.1007/978-3-319-19168-3
4. Kononova N.A. Structure and productivity of herbaceous plant communities in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 91–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-091-096
5. Radochinskaya L.P., Kladiev A.K., Rybashlykova L.P. Production potential of restored pastures of the North-western Caspian // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 1. P. 51–58. doi: 10.1134/S2079096119010086
6. Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S. On the 30th anniversary of the “General plan to combat desertification of black lands and kizlyar pastures” // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 1. P. 5–12. doi: 10.1134/52079096118010067
7. Radochinskaya L.P. Conservation of species and population biodiversity in Black land forest pastures as a factor of ecological stability in the region // Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2017. No. 3 (67). P. 161–167 (in Russian).
8. Rybashlykova L.P., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. Monitoring successional changes in pasture phytocenoses in 'exhausted' areas of deflation in the north-west Caspian region // South of Russia: Ecology, Development. 2019. V. 14. No. 4. P. 78–85 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2019-4-78-85
9. Petrov V.I. Lesoagrarное development of Black lands and adjacent territories // Bioresources. Biotechnologies. Innovations of the South of Russia: Sbornik materialov V mezhdunarodnoy nauchno-practicheskoy konferentsii. 2003. P. 41–46 (in Russian).
10. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. Wien-New York: Springer-Verlag, 1964. 865 p.
11. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR). Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 517 p.
12. Red book of the Republic of Kalmykia. In 2 volumes. V. 2. Rare and endangered plants and fungi. Elista: the ZAO NPP “Jangar”, 2014. 199 p. (in Russian).

Особенности восстановления биогеоценозов при зарастании отвалов угольных разрезов Горловского бассейна

© 2022. А. Н. Беспалов, к. б. н., н. с.,

Н. А. Соколова, м. н. с.,

Д. А. Соколов, д. б. н., в. н. с.,

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,

630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 8/2,

e-mail: A.Bespalov@bk.ru, sokolovdenis@issa-siberia.ru

Проведена комплексная оценка специфики восстановления отвалов Горловского антрацитового месторождения (Новосибирской область), включающая исследование особенностей восстановления почвенного и растительного покрова, почвенных беспозвоночных (жужелиц). Выявлено, что в составе почвенного покрова исследуемых объектов встречаются три типа почв – инициальные, органо-аккумулятивные и дерновые эмбриозёмы. С учётом специфики рельефа поверхности отвалов, а также плотности верхнего слоя почв (0–10 см) количественно оценено почвенно-экологическое состояние ключевых участков. Обнаружено 43 вида жужелиц, принадлежащих к 17 родам. Изучено взаимодействие между компонентами экосистем. С использованием статистических методов показано, что вместе с восстановлением растительных сообществ и формированием почвенного покрова на исследуемых отвалах возрастает количество видов жужелиц. Видовое разнообразие жуков-жужелиц увеличивается сингенетично улучшению почвенно-экологического состояния.

Ключевые слова: отвалы угольных разрезов, эмбриозёмы, почвенно-экологическое состояние, мезофауна, жужелицы.

Specifics of biogeocenoses restoration during overgrowth of coal-mine dumps of the Gorlovsky basin

© 2022. A. N. Bepalov ORCID: 0000-0002-3146-7477

N. A. Sokolova ORCID: 0000-0002-8927-4280

D. A. Sokolov ORCID: 0000-0002-7859-7244

The Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS
(of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences),
8/2, Lavrentieva Avenue, Novosibirsk, Russia, 630090,
e-mail: A.Bespalov@bk.ru, sokolovdenis@issa-siberia.ru

Due to the increasing volume of anthracite production in the Novosibirsk region, the area of disturbed territories is also increasing. In this regard, the problem of restoring ecosystems on dumps is acute. The vast majority of research on the restoration of man-made ecosystems is aimed at studying any one of their components. The purpose of this work was a comprehensive assessment of the specifics of recovery of waste dumps of the Gorlovsky anthracite deposit (Novosibirsk region). It included a study of the development of soil and vegetation cover, as well as an assessment of the biodiversity of soil invertebrates (for example, ground beetles). It was revealed that three types of soil are formed in the composition of the soil cover of the studied objects – initial, organo-accumulative and turf embryozems. The soil-ecological condition of sample areas was evaluated quantitatively in bonus points, taking into account the topography of the dumps (leveled and hilly areas), the density of the top layer of soil (0–10 cm), and the stage of evolution of young soils. It is shown that the succession of vegetation cover proceeds in the direction from pioneer groups to closed phytocenoses simultaneously with the development of young soils. The population of ground beetles was studied. 43 species belonging to 17 genera were found. The interaction between ecosystem components is studied. Using statistical methods, it is shown that along with the restoration of plant communities and the formation of soil cover on the studied dumps, both the number of species of ground beetles and the indices of diversity increase. Species are replaced by specialized ones, and the number of dominants increases. The species diversity of ground beetles increases syngenetically to the improvement of the soil-ecological condition.

Keywords: coal-mine dumps, embryozems, soil-ecological condition, mesofauna, Carabidae.

Горловский угольный бассейн расположен на правобережье Оби в административных границах Новосибирской области. Угли бассейна представлены антрацитами [1]. За последнее десятилетие объёмы добычи угля в бассейне увеличились многократно, что способствовало значительному расширению площадей нарушенных территорий. Исследованию возможностей восстановления техногенных ландшафтов как в России, так и за рубежом в последнее время уделяется большое внимание. На угольных отвалах изучались: почвенный покров [2], процессы почвообразования [3], растительный покров [4] и различные группы почвенных организмов [5–8]. В то же время существующих работ явно недостаточно для понимания полной картины функционирования и восстановления техногенных ландшафтов.

Цель нашего исследования заключалась в изучении взаимосвязей между почвенными беспозвоночными, а именно жужелицами, почвой и растительностью на отвалах антрацитового месторождения.

Материалы и методики исследования

Исследования проводили на 25-летних отвалах Горловского угольного бассейна в Искитимском районе Новосибирской области. Было выбрано 8 учётных площадок: 5 травянистых участков (3 мезофитных луга и 2 участка с пионерной растительностью) и 3 – с древесной растительностью (заросли кустарников, берёзовый колок и тополиная роща).

Жужелиц собирали в мае – июле 2017 г. с помощью почвенных ловушек диаметром 65 мм и объёмом 200 мл, заполненных на одну треть 4% раствором уксусной кислоты. На каждом участке было установлено по 5 ловушек, проверялись они раз в неделю. Было отработано около 1300 ловушко-суток.

Кластерный анализ, статистическую обработку данных проводили в программе PAST 3.09. К видам доминантного комплекса отнесены виды, доля которых в учётах не ниже 5%. В анализе видового богатства использовали индекс разнообразия Маргалефа, степень доминирования оценивали по индексу Бергера-Паркера, сложность структуры сообщества жужелиц – по индексу биоразнообразия Шеннона [9]. Экологические группы жужелиц по биотопической приуроченности определены на основе литературных источников [6, 10] и собственных наблюдений.

Почвенно-экологическое состояние исследованных участков оценивали в баллах, отражающих специфику рельефа поверхности, плотности верхнего слоя почвы, соотношения типов эмбриозёмов, сформированных на поверхности. Для оценки соотношения типов молодых почв выбирали площадки 10×10 м; долю участия каждого типа эмбриозёма в почвенном покрове определяли методом квадратов [11]. Выраженность рельефа определяли при помощи мерной ленты. Ленту прокладывали на поверхности участка, а затем натягивали над поверхностью. Выраженность рельефа вычисляли по формуле:

$$R = L_n/L_0, \quad (1)$$

где L_n – длина ленты на поверхности; L_0 – длина натянутой ленты. Плотность верхнего слоя (0–10 см) эмбриозёмов измеряли пелетрометром и пересчитывали показания на объёмный вес почв (d_v).

Диагностику почв осуществляли с использованием классификации почв техногенных ландшафтов, разработанной сотрудниками ИПА СО РАН [2]. Типы почв, сформированных на поверхности отвала, составляют эволюционный ряд от инициальных до дерновых эмбриозёмов. Предложено считать балл почвенно-экологического состояния (ПЭС) участков, занятых инициальными эмбриозёмами, за 0; органо-аккумулятивными – за 33; дерновыми – за 66; естественных прилегающих участков – за 100 [12]. Средневзвешенный балл почвенно-экологического состояния вычисляли, исходя из соотношения типов эмбриозёмов на участке, а также значений выраженности рельефа и плотности сложения верхнего слоя. Для этого использовали формулу:

$$ПЭС = (B_{э_1} \cdot R \cdot S_1)/d_{v_1} + (B_{э_2} \cdot R \cdot S_2)/d_{v_2} + \dots + (B_{э_n} \cdot R \cdot S_n)/d_{v_n}, \quad (2)$$

где ПЭС – балл почвенно-экологического состояния учётного участка; $B_{э_1} \dots B_{э_n}$ – бонитет типа эмбриозёма; R – выраженность рельефа на участке; $S_1 \dots S_n$ – площадь типа эмбриозёма, в долях от общей площади участка; $d_{v_1} \dots d_{v_n}$ – плотность сложения верхнего слоя соответствующего типа эмбриозёмов.

Результаты и обсуждение

Почвы и растительность. Исследования показали, что на поверхности отвала форми-

руются эмбриозёмы трёх типов: инициальные, органо-аккумулятивные и дерновые. Формирование биоценозов сопряжено с этапами развития почв. На начальном этапе формирования биоценоза основу растительности составляют пионерные виды, их проективное покрытие менее 10%, поступление органического вещества в почву незначительно. Для этой стадии характерно развитие *инициальных эмбриозёмов (IE)*, не имеющих в профиле выраженного органогенного горизонта. Типодиагностическим в *органо-аккумулятивных эмбриозёмах (OAE)* является горизонт накопления подстилки, представленной слабо-разложившимся растительным опадом. Для *дерновых эмбриозёмов (TE)* типодиагностическим является дерновый горизонт [3].

Субстраты, слагающие отвал, представлены смесью различных по размеру обломков плотных осадочных пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников). Все исследуемые участки делятся на спланированные (выровненные) (IN3, IN5, ML4, ML6, K1) и неспланированные (OT8, ZK7, ML2). Описания участков приведены в таблице 1.

Таким образом, ключевые участки по степени развития растительности и почвенного покрова выстраиваются в следующий ряд (расшифровка обозначений в таблице 1): IN3 – IN5 – OT8 – ML4 – ML6 – ZK7 – K1 – ML2.

Баллы почвенно-экологического состояния (ПЭС) на ключевых участках сбора жу-желиц приведены в таблице 2. При анализе таблицы прослеживается чёткая тенденция к увеличению баллов ПЭС вместе со сменой стадий эволюции почвенно-растительного покрова.

Мезофауна (жу-желицы). В отличие от почвы и растений животные обладают важным качеством – возможностью передвижения в пространстве и, соответственно, выбора наиболее подходящих для своего существования местообитаний. Жуки являются крупнейшей группой среди насекомых и живых существ в целом. Жу-желицы – одно из самых больших и многочисленных семейств жуков, они являются наиболее информативным объектом для зоодиагностики техногенных местообитаний [13], позволяющих чётко проследить сукцессионные смены и установить их направление.

Таблица 1 / Table 1

Описание ключевых участков исследования
Description of sample plots of research

Номер участка, обозначение Plot number, designation	Местонахождение Location	Растительность Vegetation cover	Почвенный покров Soil cover
Участок 1 K1	54°33'56,7"N 83°36'12,0"E	Древесная: берёзовый лес; травянистая: мать-и-мачеха, кипрей, донник; напочвенный покров: подстилка	100% OAE
Участок 2 ML2	54°33'55,7"N 83°36'11,8"E	Древесная: отсутствует; травянистая: ежа сборная, ко-стрец; напочвенный покров: ветошь	30% OAE : 70% TE
Участок 3 IN3	54°33'56,2"N 83°36'09,6"E	Древесная: отсутствует; травянистая: донник, полынь, одуванчик; напочвенный покров: отсутствует	100% IE
Участок 4 ML4	54°34'09,9"N 83°36'41,9"E	Древесная: подрост осины и тополя высотой до 1,5 м; травянистая: донник, люцерна; напочвенный покров: фрагментарно ветошь	50% IE : 50% OAE
Участок 5 IN5	54°34'14,7"N 83°36'40,9"E	Древесная: подрост берёзы, тополя и сосны; травянистая: одуванчик, полынь, клевер ползучий; напочвенный покров: фрагментарно ветошь	90% IE : 10% OAE
Участок 6 ML6	54°34'18,8"N 83°36'44,7"E	Древесная: подрост осины, берёзы; травянистая: донник, синяк; напочвенный покров: ветошь	30% IE : 70% OAE
Участок 7 ZK7	54°34'17,8"N 83°36'42,3"E	Древесная: осина, ива козья; травянистая: кипрей, донник, мать-и-мачеха; напочвенный покров: подстилка	20% IE : 80% OAE
Участок 8 OT8	54°34'19,7"N 83°36'36,9"E	Древесная: подрост осины и тополя; травянистая: мать-и-мачеха, одуванчик, мелколепестник, кипрей; напочвенный покров: фрагментарно подстилка	95% IE : 5% OAE

Примечания: IE – эмбриозём инициальный; OAE – эмбриозём органо-аккумулятивный; TE – эмбриозём дерновый.
Notes: IE – initial embryozem; OAE – organo-accumulative embryozem; TE – turf embryozem.

Таблица 2 / Table 2

Расчёт баллов почвенно-экологического состояния (ПЭС) на ключевых участках
Calculation of soil-ecological condition (SEC) points of sample areas

Название биотопа Biotope name	Соотношение типов эмбриозёмов Ratio of types of embryozems	Плотность слоя 0–10 см, г/см ³ Layer 0–10 cm density, g/cm ³	Выраженность рельефа Relief expression	ПЭС, баллы SEC, points
K1	OAE	1,6	1,02	50,20
ML2	0,3 EOA : 0,7 TE	1,4; 1,3	1,1	40,78
IN3	IE	2,2	1,0	28,78
ML4	0,5 IE : 0,5 OAE	2,2; 1,6	1,0	49,83
N5	0,9 IE : 0,1 OAE	2,2; 1,6	1,0	29,95
ML6	0,3 IE : 0,7 OAE	2,2; 1,6	1,0	48,55
ZK7	0,2 IE : 0,8 OAE	1,3; 1,4	1,2	44,08
OT8	0,95 IE : 0,05 OAE	2,2; 1,6	1,1	38,23

Примечания: обозначения, как в таблице 1.
Notes: designations, as in table 1.

Таблица 3 / Table 3

Параметры таксоценов жуужелиц в разных биотопах
Parameters of taxocenoses of ground beetles in different biotopes

Показатель разнообразия Diversity indicator	Биотопы / Biotopes							
	K1	ML2	IN3	ML4	IN5	ML6	ZK7	OT8
Число видов Number of species	8	22	5	13	5	17	5	2
Средняя динамическая плотность, экз./100 ловушко-суток Average dynamic density, ex./100 trap-days	47	67	6,3	68	125	47	7,9	0,9
Индекс Бергера-Паркера Berger-Parker index	0,48	0,44	0,45	0,45	0,92	0,34	0,73	0,50
Индекс Шеннона H Shannon H index	1,56	2,07	1,41	1,68	0,35	2,04	0,95	0,70
Индекс Маргалефа Margalef index	1,83	4,27	1,67	2,55	0,81	3,52	1,48	1,44

Индекс доминирования Бергера-Паркера почти на всех участках имеет средние значения (табл. 3). Такие его значения показывают, что сообщества жуужелиц на нарушенных территориях характеризуются небольшим количеством доминирующих видов и значительным числом видов с низким обилием. Исключение составил только участок с пионерной растительностью IN5 за счёт супердоминанта *Apristus striatus* и участок с зарослями кустарника ZK7 за счёт доминирования *Harpalus rubripes*.

Наибольшее значение индекса видового богатства Маргалефа отмечено для группы мезофитных лугов (2,55–4,27), что указывает на большее видовое богатство данных сообществ жуужелиц. Наименьшее значение индекса отмечено для группы выровненных площадок с пионерной растительностью (0,81–1,67), что

показывает бедность сообществ жуужелиц на этих участках.

Биотопический спектр жуужелиц сформирован 6 экологическими группами (рис.). В фауне берёзового колка 1 (K1) преобладает лугово-степная группа, на втором месте находятся эвритопная и лесная группа. В населении резко преобладает лесная группа за счёт доминирующего здесь *Pterostichus oblongopunctatus*. В остальных древесных биотопах (тополевая роща и заросли кустарников) такая смена экологических групп не отмечается. Для травянистых участков (ML2, ML4 и ML6) как в фауне, так и в населении, характерно преобладание лугово-степных видов (за счёт доминирующего здесь *Calathus erratus*) с высокой долей эвритопных видов. В фауне открытых площадок (IN3 и IN5) преобладают виды жуужелиц, относящиеся к лугово-

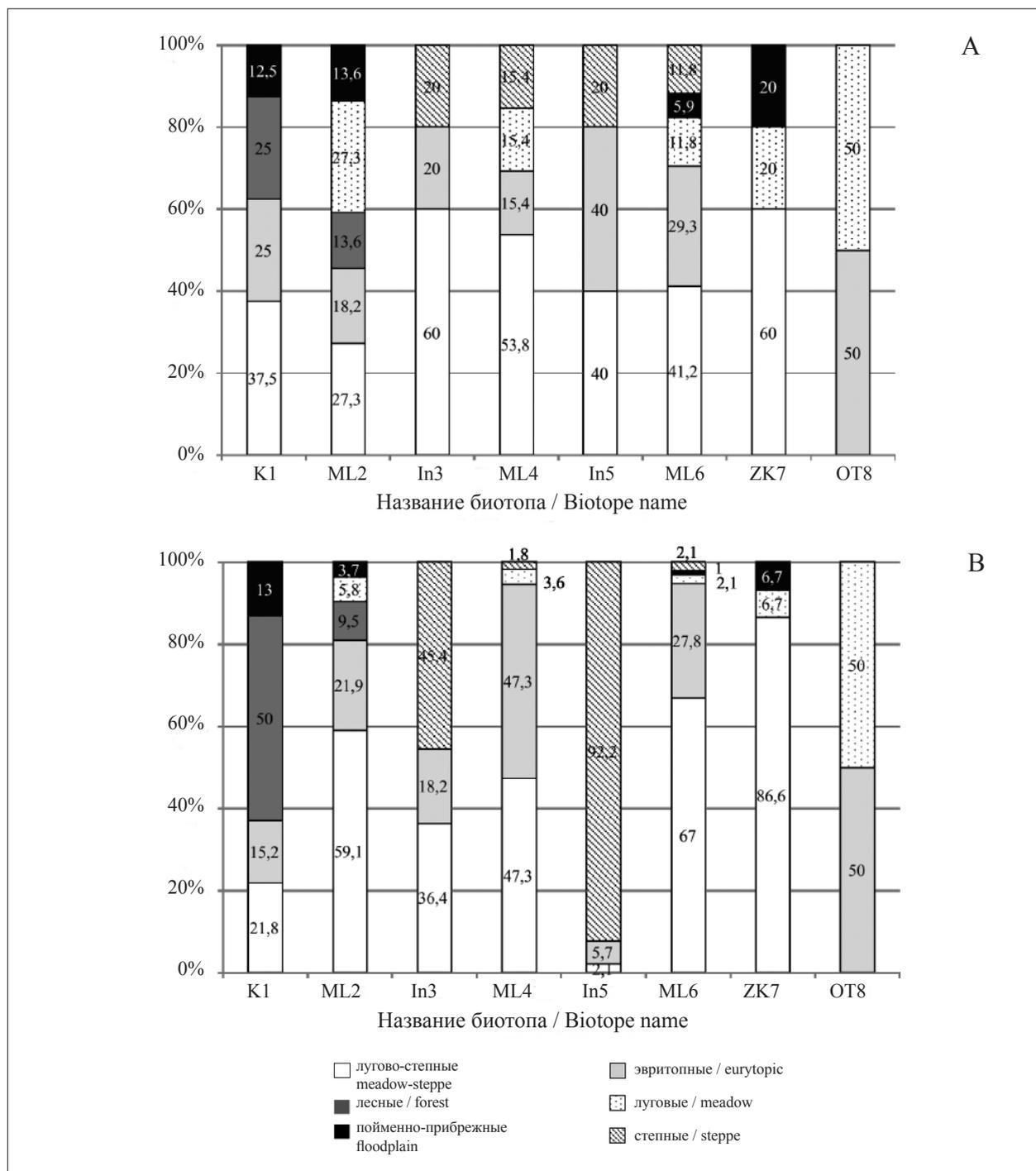


Рис. Соотношение экологических групп жуужелиц: А – по числу видов, В – по числу суммарной уловистости. Обозначения биотопов, как в таблице 1
Fig. The ratio of ecological groups of ground beetles: А – by the number of species, В – by the number of total catch. Designations of biotopes, as in table 1

степной группе, но представители эвритопной и степной группы также имеют значительный вес, а в населении преобладают представители степной группы. В целом можно отметить, что для нарушенных участков характерно доминирование лугово-степных видов.

Данные таблицы 4 показывают, что при восстановлении растительных ценозов и почвенного покрова увеличиваются как количе-

ство видов жуужелиц, так и показатели разнообразия. Структура сообществ герпетобионтов усложняется по мере эволюции посттехногенных ландшафтов; виды замещаются более узкоспециализированными; количество доминантных видов увеличивается. В то же время полного восстановления биоценозов до уровня биоразнообразия естественных территорий на данном отвале за 25 лет не происходит.

Таблица 4 / Table 4

Корреляции баллов почвенно-экологического состояния (ПЭС) с показателями биоразнообразия
Correlation of the SEC (soil-ecologic condition) points with the biodiversity indicators

Показатель биоразнообразия Biodiversity indicator	Корреляция с баллами ПЭС Correlation with SEC points
Число видов / Number of species	0,50
Средняя динамическая плотность / Average dynamic density	-0,25
Индекс Бергера-Паркера / The Berger-Parker index	-0,58
Индекс Шеннона / Index Shannon H	0,69
Индекс Маргалефа / Margalef Index	0,55

Заключение

Проведённые исследования показали, что восстановление всех компонентов экосистем техногенных ландшафтов (растительность, почвы, мезофауна) происходит одновременно. Выявлено, что в составе почвенного покрова исследуемых объектов встречаются три типа почв – инициальные, органо-аккумулятивные и дерновые эмбриозёмы. Неудовлетворительным почвенно-экологическим состоянием характеризуются молодые участки с пионерной растительностью и простейшей структурой сообщества жуков-жужелиц. Хорошим почвенно-экологическим состоянием характеризуются старые участки с травянистой растительностью, где сообщества жужелиц имеют более сложную структуру и максимальное видовое богатство. Таким образом, видовое разнообразие жуков-жужелиц увеличивается сингенетично сукцессии растительных сообществ и улучшению почвенно-экологического состояния. При этом полного восстановления биоценозов до уровня биоразнообразия естественных ландшафтов не происходит даже за 25 лет.

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН.

References

1. The coal base of Russia. V. 2. Coal basins and deposits of Western Siberia (Kuznetsk, Gorlovsky, West Siberian basins, deposits of the Altai Territory and the Republic of Altai). Moskva: Geoinformtsentr, 2003. 604 p. (in Russian).
2. Androkhanov V.A., Sokolov D.A. Soil evolution and reclamation of technogenic landscapes in Siberia // *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals* / Ed. V. Litvinenko. CRC Press, 2020. P. 268–273. doi: 10.1201/9781003164395-33
3. Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko S.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2015. No. 1. P. 95–105. doi: 10.1134/S106422931501015
4. Frouz J., Mudrák O., Reitschmiedová E., Walmsley A., Vachová P., Šimáčková H., Albrechtová J., Moradi J.,

Kučera J. Rough wave-like heaped overburden promotes establishment of woody vegetation while leveling promotes grasses during unassisted post mining site development // *Journal of Environmental Management*. 2018. No. 205. P. 50–58. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.09.065

5. Dunger W., Voigtländer K. Soil fauna (Lumbricidae, Collembola, Diplopoda and Chilopoda) as indicators of soil eco-subsystem development in post-mining sites of eastern Germany – a review // *Soil Organisms*. 2009. V. 81. No. 1. P. 1–51.

6. Luzyanin S.L., Dudko R.Yu., Bepalov A.N., Ereemeeva N.I. Biodiversity of carabids (Coleoptera, Carabidae) on coal mining dumps of Kuzbass region, Kemerovskaya oblast', Russia // *Euroasian Entomological Journal*. 2015. V. 14. No. 5. P. 625–628 (in Russian).

7. Artamonova V.S., Bortnikova S.B. About the development of *Azotobacter chroococcum* Beijerinck in old-age dumps of anthracite // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 1. P. 60–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-060-072

8. Moradia J., Vicentinia F., Simackovaa H., Pizlb V., Tajovskyb K., Saryb J., Frouz J. An investigation into the long-term effect of soil transplant in bare spoil heaps on survival and migration of soil meso and macrofauna // *Ecological Engineering*. 2018. No. 110. P. 158–164. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.012

9. Megarran E. Ecological diversity and its measurement. Moskva: Mir, 1992. 161 p. (in Russian).

10. Andersen J. Winter quarters of wetland ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in South Scandinavia // *Journal of Insect Conservation*. 2011. V. 15. P. 799–810. doi: 10.1007/s10841-011-9378-7

11. Androkhanov V.A., Kurachev V.M. Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2010. 224 p. (in Russian).

12. Gossen I.N., Kulizhskiy S.P., Danilova E.B., Sokolov D.A. A valuation approach to assessing the soil-ecological state of technogenic landscapes of Siberia (on the example of dumps of anthracite, coal and brown coal deposits) // *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No. 2. P. 71–82 (in Russian).

13. Koivula M.J. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions // *ZooKeys*. 2011. No. 100. P. 287–317. doi: 10.3897/zookeys.100.1533

Разложение поли(ϵ -капролактона) в лабораторных условиях при выдержке на воздухе и в почве

© 2022. Е. С. Широкова, к. х. н., доцент,
Е. В. Товстик, к. б. н., с. н. с., доцент,
А. В. Сазанов, к. б. н., руководитель центра компетенций, доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

В работе представлены результаты оценки деструкции плёнок из поли(ϵ -капролактона) (ПКЛ) – одного из представителей сложных полиэфиров, используемых для производства гибкой упаковки, а также полиэтилена высокого давления (ПЭ), служившего в качестве образца сравнения. Опыт проводили в лабораторных условиях (одностороннее боковое освещение помещения; температура 20 ± 2 °C) при выдержке образцов в почве и на воздухе в течение 12 месяцев. Изменения, произошедшие в полимерных материалах, оценивали по внешнему виду образцов, потере их абсолютной массы, данным ИК-спектроскопии и термогравиметрии. По численности микромицетов в почве, в которой выдерживали образцы полимеров, косвенно судили об их способности к биоразложению. О безопасности продуктов деструкции судили по результатам контактного биотестирования почвы с использованием редиса сорта Жара, проведённого по аттестованным методикам с учётом международных стандартов. Способность полимерных материалов к биодegradации под действием микромицетов подтверждали в тесте на грибостойкость. В качестве тест-культуры использовали штамм мицелиального гриба *Fusarium proliferatum* AC. Дegradация в почве за исследованный промежуток времени была характерна только для образцов плёнок из ПКЛ. При этом фитотоксического влияния продуктов деструкции ПКЛ в почве не установлено. Признаки протекания процесса окисления ПЭ отмечены на 3-й месяц его выдержки на воздухе. В почве ПЭ проявлял стойкость к degradation. По результатам работы сделано заключение о необходимости создания специальных условий утилизации для ПКЛ, несмотря на его биоразлагаемость, доказанную в лабораторных экспериментах.

Ключевые слова: поли(ϵ -капролактон), полиэтилен, почва, воздух, биоразложение, численность микромицетов, грибостойкость, *Fusarium proliferatum* AC.

Degradation of poly(ϵ -caprolactone) under laboratory conditions during exposure to air and soil

© 2022. E. S. Shirokova ORCID: 0000-0001-5735-3489[†]
E. V. Tovstik ORCID: 0000-0003-1861-6076[‡]
A. V. Sazanov ORCID: 0000-0002-6934-3330[§]
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr06779@vyatsu.ru

Various aliphatic polyesters are used to provide biodegradable compostable packaging materials. They are a group of materials with a wide range of thermal, mechanical and biodegradability properties that can be easily adapted to a specific application. However, when using such materials for packaging solutions, their release into the environment after the end of the product's service life is not excluded. In this regard, the assessment of changes occurring with polymeric material in soil and in air is of interest.

The paper presents the results of assessing the degradation of films made from poly(ϵ -caprolactone) (PCL), one of the representatives of polyesters used for the production of flexible packaging, as well as high-density polyethylene (HDPE), which served as a reference sample. The experiment was carried out in laboratory conditions (natural light; temperature 20 ± 2 °C) with exposure of the samples in the soil and in the air for 12 months. The changes in the polymer materials assessed by the appearance of the samples, the loss of their absolute mass, as well as IR spectroscopy and thermogravimetry data. The number of micromycetes in the soil in which the polymer samples were kept was indirectly judged to be biodegradable. The safety of degradation products was judged by the results of contact biotesting of soil using radish (variety Zhara), carried out according to certified methods, taking into account international standards. The ability of polymeric materials to biodegrade under the action of micromycetes was confirmed in a fungus resistance test.

A strain of mycelial fungus *Fusarium proliferatum* AC was a test culture. Degradation in the soil over the studied period was typical only for samples of PCL films. At the same time, the phytotoxic effect of PCL degradation products in the soil was not established. Signs of HDPE oxidation were indicated on the 3rd month of its air incubation. HDPE showed resistance to degradation in the soil. Based on the results of the work, a conclusion was made about the need to create special conditions for the disposal of PCL, despite its biodegradability proven in laboratory experiments.

Keywords: poly(ϵ -caprolactone), polyethylene, soil, air, biodegradation, fungus resistance, *Fusarium proliferatum* AC.

Полимерные материалы используются практически во всех отраслях промышленности по всему миру. Большинство из них представляют собой материалы, не способные к биодegradации, что ведёт к увеличению объёмов накапливаемых полимерных отходов. Особенно это касается использования полимеров для производства упаковочных материалов. К настоящему времени многие компании сталкиваются с проблемой обращения с полимерными отходами. Единственным решением, которое окажется эффективным в долгосрочной перспективе, является использование полимерных материалов с регулируемой способностью к разложению, в том числе биоразлагаемых компостируемых полимеров.

Для создания биоразлагаемых компостируемых упаковочных материалов находят применение алифатические сложные полиэфиры, которые представляют собой группу материалов с широким диапазоном термических, механических свойств, способности к биоразложению, которые могут быть легко адаптированы для конкретного применения [1, 2].

Так, для производства гибкой упаковки наиболее привлекателен поли(ϵ -капролактон) (ПКЛ). Данный полимер широко используется как для производства экологически безопасной упаковки, так и в биомедицинских целях. Его получают полимеризацией с раскрытием цикла ϵ -капролактона [3].

Поли(ϵ -капролактон) характеризуется низкой температурой плавления (59–64 °C), низкой вязкостью расплава, хорошей растворимостью, а также отличной совместимостью с другими полимерами [4].

Вопросам деградации ПКЛ посвящено значительное количество работ, которые систематизированы в обзоре [5], имеется ряд работ, посвящённых деградации ПКЛ в процессе компостирования, с помощью изолированных культур грибов, а также в активном иле и др. [6, 7].

Однако при использовании ПКЛ для производства упаковочных материалов не исключается его попадание в окружающую среду после завершения срока эксплуатации изделия.

Цель работы – оценка разложения поли(ϵ -капролактона) в лабораторных условиях при выдержке на воздухе и в почве с помощью физико-химических методов анализа, а также возможного влияния продуктов деструкции на микробиологические свойства почвы и её фитотоксичность.

Объекты и методы исследования

В настоящей работе в лабораторных условиях (одностороннее боковое естественное освещение помещения; температура 20 ± 2 °C) оценивали изменения, происходящие с полимерными материалами при выдержке в почве и на воздухе в открытых контейнерах.

Для эксперимента использовали поли(ϵ -капролактон) eSUN600C производства Shenzhen Esun Industrial Co. (Shenzhen, China). Образцы для исследований представляли собой плёнки толщиной $1,45 \pm 0,10$ мм. Их получение осуществляли самостоятельно путём прокатки предварительно разогретого полимера. В качестве образца сравнения использовали выпускаемую промышленностью плёнку на основе полиэтилена высокого давления (ПЭ) (толщина $0,07 \pm 0,01$ мм), который не относится к биоразлагаемым полимерным материалам.

Для проведения исследований моделировали условия, приближённые к естественным условиям среды, характерным для физико-географических особенностей Кировской области: использовали преобладающий тип почвы – дерново-подзолистый. Основные свойства почвы были следующими: $pH_{\text{сол.}}$ 4,2; $pH_{\text{водн.}}$ 5,3; содержание органического вещества и подвижного фосфора 1,6% и 21 мг/кг соответственно.

Предварительно взвешенные с точностью до 0,0001 г образцы плёнок размером 20×20 мм размещали в стеклянных ёмкостях объёмом 100 см³, наполненных почвой, на срок до 12-и месяцев. Выдержку полимерных материалов в почве осуществляли при постоянном увлажнении дистиллированной водой на уровне 60% от полной влагоёмкости. Массу почвы, используемой в испытаниях, определяли из расчёта 1 г почвы на 1 см² поверхности

образца. Все эксперименты проводили в двухкратной повторности.

Через заданные промежутки времени (3, 6, 9, 12 месяцев) образцы полимерных материалов извлекали из соответствующей среды. В случае выдержки в почве плёнки дополнительно промывали дистиллированной водой и выдерживали при температуре 20 ± 2 °С до постоянной массы.

В пробах почвы, отобранных после выдержки в них плёнок, оценивали численность микромицетов. Выбор численности микромицетов в качестве показателя биодegradации обусловлен тем, что данная физиологическая группа микроорганизмов (МО) играет важную роль в деструкции природных полимеров в почве. Для микробиологического анализа составляли объединённую пробу почвы с соблюдением правил асептики. Далее готовили серию почвенных разведений с последующим посевом их на плотную питательную среду Чапека (сахароза – 30; NaNO_3 – 3; KH_2PO_4 – 4; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; KCl – 0,5; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,01; агар-агар – 20 г/дм³) [8]. Инкубацию посевов осуществляли в термостате при 27 °С. Учёт численности микромицетов производили на седьмые сутки роста после посева. Дополнительно чашки просматривали на 10-е сутки для учёта медленно растущих видов.

Для оценки изменений, произошедших в полимерном материале, использовали визуальный контроль, методы гравиметрии, ИК-Фурье-спектроскопии и термического анализа.

Оценку изменения массы образцов проводили с использованием весов ВЛ-242В НПП «Госметр» (Россия). Изменение массы (Δm , %) оценивали по следующей формуле:

$$\Delta m(\%) = 100\% + \frac{(m_t - m_{\text{нач.}}) \cdot 100\%}{m_{\text{нач.}}}$$

где $m_{\text{нач.}}$ и m_t – масса образца начальная и по истечению заданного промежутка времени соответственно, г.

Идентификацию функциональных групп в химической структуре полимерных материалов проводили с помощью ИК-Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801» (Россия).

Для оценки температурных характеристик использовали синхронный термогравиметрический и дифференциальный анализатор (ТГ/ДТА) DTG-60 фирмы Shimadzu (Япония). Измерение проводили в атмосфере воздуха (150 см³/мин) на образцах (для образцов из ПЭ масса составляла $2,2 \pm 0,3$ мг, из ПКЛ –

$11,5 \pm 1,5$ мг), размещаемых в платиновом тигле; оксид алюминия использовался в качестве стандарта. Образец нагревали со скоростью 10 °С/мин от комнатной температуры до 550 °С. Оценивали температуру, соответствующую убыли массы в 10%.

Способность полимерных материалов к биодegradации под действием микромицетов подтверждали в тесте на грибостойкость. Для опыта использовали штамм мицелиального гриба *Fusarium proliferatum* AC (Genbank Accession number MT280199), ранее выделенный из почвы [9]. Для подготовки изолята готовили агаризированную питательную среду Чапека в чашках Петри. На поверхность среды засеивали споровую суспензию *F. proliferatum* AC и выращивали в термостате при температуре 27 °С в течение пяти суток. Из газона выросших на поверхности плотной питательной среды колоний с помощью сверла вырезали агаровые блочки диаметром 6 мм и помещали в колбы Эрленмейера с жидкой питательной средой Чапека. В качестве контроля использовали среду без *F. proliferatum* AC. В колбы с соблюдением правил асептики вносили предварительно обработанные 70% этиловым спиртом образцы плёнок. Культивирование образцов осуществляли на шейкере при 160 об./мин 8/16 ч в течение 1 месяца. По истечении времени оценивали грибостойкость плёнок по появлению на их поверхности микроколоний, видимых невооружённым глазом, и развитию мицелия гриба (биомасса) в питательной среде. В случае его интенсивного роста делали заключение об отсутствии грибостойкости у образцов.

Исследование токсичности проб почвы, отобранных после выдержки в них полимерных материалов, проводили с помощью контактного биотестирования по аттестованным методикам с учётом международных стандартов ИСО 11269-1; 11269-2 [10, 11]. В качестве тест-объектов использовали характеризующиеся небольшим запасом питательных веществ семена редиса сорта Жара. Проверяемой тест-функцией служила максимальная высота побегов и длина корней, всхожесть семян, а также биомасса проростков в контрольных и опытных пробах. Все опыты проводили в трёхкратной повторности, количество семян в повторности – 30 шт. Для характеристики класса токсичности почвы рассчитывали индекс токсичности (ИТФ), равный сумме отношений значений регистрируемых функций в опыте и контроле, делённой на количество проверяемых тест-функций. Для интерпре-

тации полученных результатов использовали шкалу, приведённую в работе [12].

Статистическую обработку результатов всех измерений проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011.

Результаты и обсуждение

Известно, что скорость биodeградации полимеров в почве определяется многочисленными факторами. Среди них активность микробного комплекса почвы, неотъемлемым компонентом которого являются микромицеты [13]. Данные МО наряду с бактериями в настоящее время всё чаще упоминаются как потенциальные деструкторы полимеров [14]. Особенностью микромицетов как деструкторов является наличие гиф мицелия, быстрый рост которых зачастую приводит к механическому разрушению полимеров. Кроме того, для микромицетов характерно наличие мощного ферментативного аппарата, действие которого способно вызывать поверхностную эрозию полимеров [15, 16].

Микробиологический анализ проб почвы, которые были отобраны после выдержки в них полимерных плёнок, позволил установить разницу в численности микромицетов. Она зависела как от срока выдержки полимерного материала в почве, так и от его состава (рис. 1).

Значимые отличия от контроля отмечали для ПКЛ. В этом случае, независимо от срока наблюдений, численность микромицетов в

почве была на порядок выше, чем в контроле, и составляла сотни тыс. КОЕ/г. Следует отметить, что за период наблюдений численность микромицетов в почве, в которой выдерживалась плёнка из ПКЛ, достоверно увеличилась в два раза, что могло быть связано с наличием в среде дополнительного источника питания для них. Подобной закономерности в варианте опыта с ПЭ не было зафиксировано.

Очевидное микробиологическое воздействие на плёнки из ПКЛ после выдержки их в почве фиксировали и по изменению внешнего вида образцов. На поверхности плёнок отмечали появление желтоватых, тёмно-коричневых, а также серых пятен, косвенно свидетельствующих о колонизации образцов почвенными МО. Причём с увеличением срока выдержки плёнки из ПКЛ в почве степень поражения её поверхности увеличивалась.

Для образцов плёнок из ПЭ после выдержки их в почве, а также образцов из ПКЛ и ПЭ после выдержки на воздухе при комнатной температуре существенных изменений их внешнего вида не зафиксировано.

Для отслеживания изменений, происходящих с полимерными материалами при выдержке их в почве и на воздухе, производили определение массы образцов на разных сроках наблюдения. Отмечали существенную потерю веса образцов из ПКЛ, выдержанных в почве, что свидетельствует об их деградации (рис. 2а). Как и для других полиэфиров,

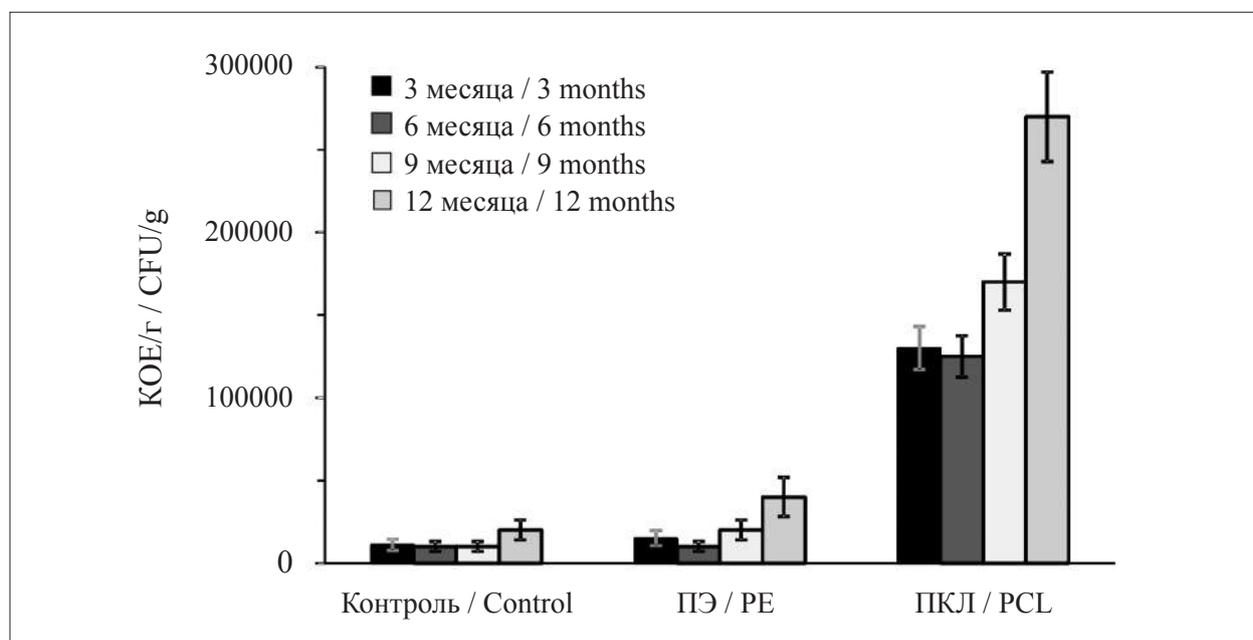


Рис. 1. Численность микромицетов в пробах почвы, отобранных после выдержки в них полимеров
Fig. 1. The number of micromycetes in soil samples taken after exposure to polymers

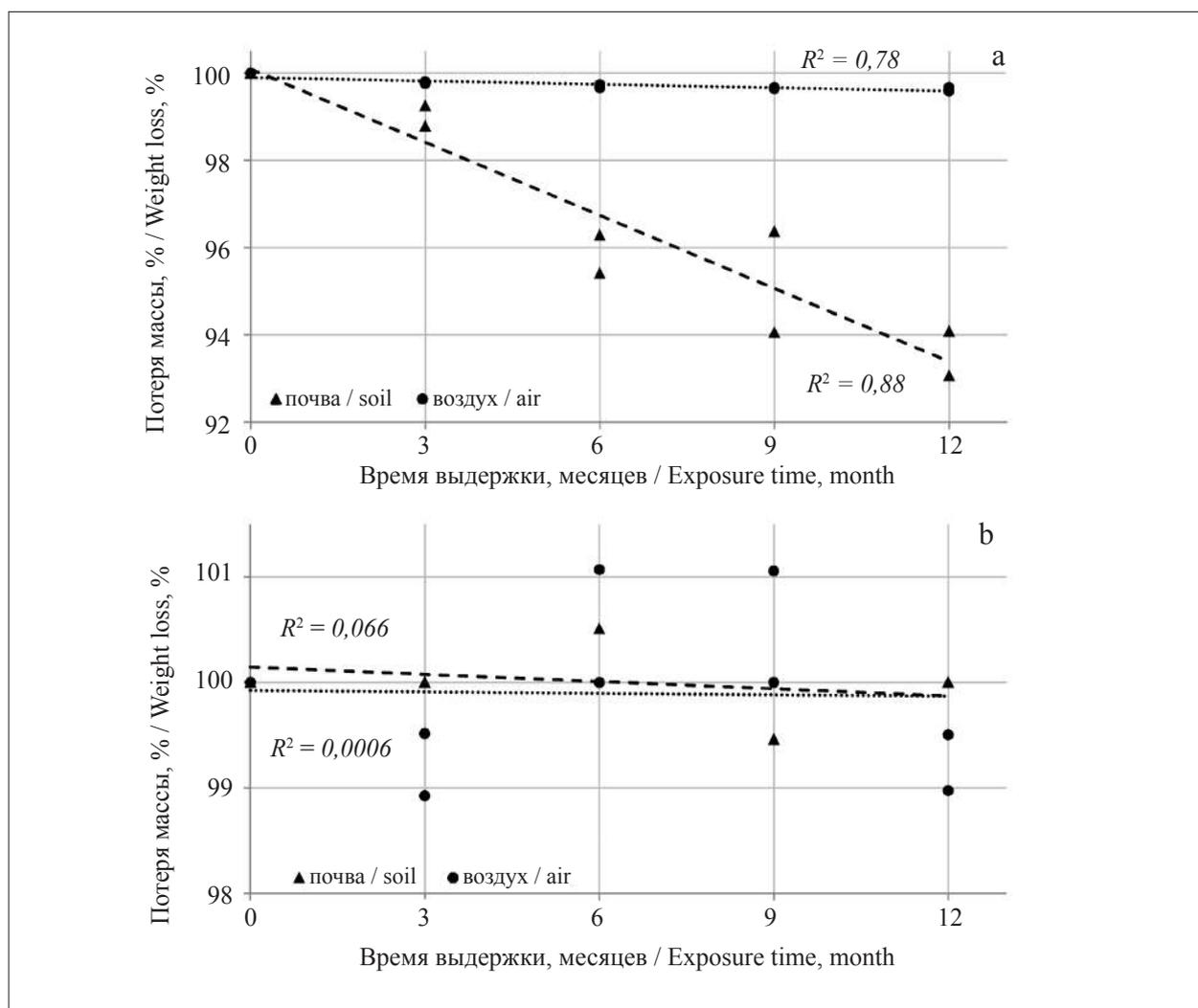


Рис. 2. Изменение массы образцов в лабораторных условиях при выдерживании их в почве и на воздухе (на график нанесены все значения, полученные в ходе измерений): а – ПКЛ; б – ПЭ
Fig. 2. Weight loss of polymer samples after exposure in soil and air: а – PCL; б – PE

для ПКЛ основным механизмом деградации является гидролиз сложноэфирных связей. Механизм гидролитического разложения алифатических полиэфиров протекает в три фазы, которые включают инкубационный период (поглощение воды), индукционный период (уменьшение молекулярной массы) и период эрозии полимера (потеря массы образца), как указано в [7].

При выдержке на воздухе образцов из ПКЛ значительных изменений в массе не отмечалось (рис. 2а). Для плёнок из ПЭ не выявлено достоверных изменений в массе (рис. 2б).

Для оценки структурных изменений в полимерных материалах предполагалось использовать метод ИК-Фурье-спектроскопии. Однако ввиду колонизации плёнок из ПКЛ почвенными МО, получить качественные спектры для них не удалось.

ИК-спектры образцов из ПЭ после выдержки их в различных средах представлены на рисунке 3 (для наглядности продемонстрированы ИК-спектры только после 12-ти месячной выдержки).

Как можно видеть, существенные изменения отмечаются только для образца из ПЭ, находившегося на воздухе: появляется пик в области 1740–1720 см⁻¹, соответствующий валентным колебаниям связи С=О [18, 19], что может свидетельствовать о протекании процесса окисления. Данный пик, но с меньшей интенсивностью, наблюдался для образцов, выдержанных на воздухе уже в течение 3-х месяцев.

Для оценки изменений, происходящих с полимерными материалами, использовали изменение показателя T₁₀ – температуры убыли 10% массы, полученного по результатам термogravиметрического анализа.

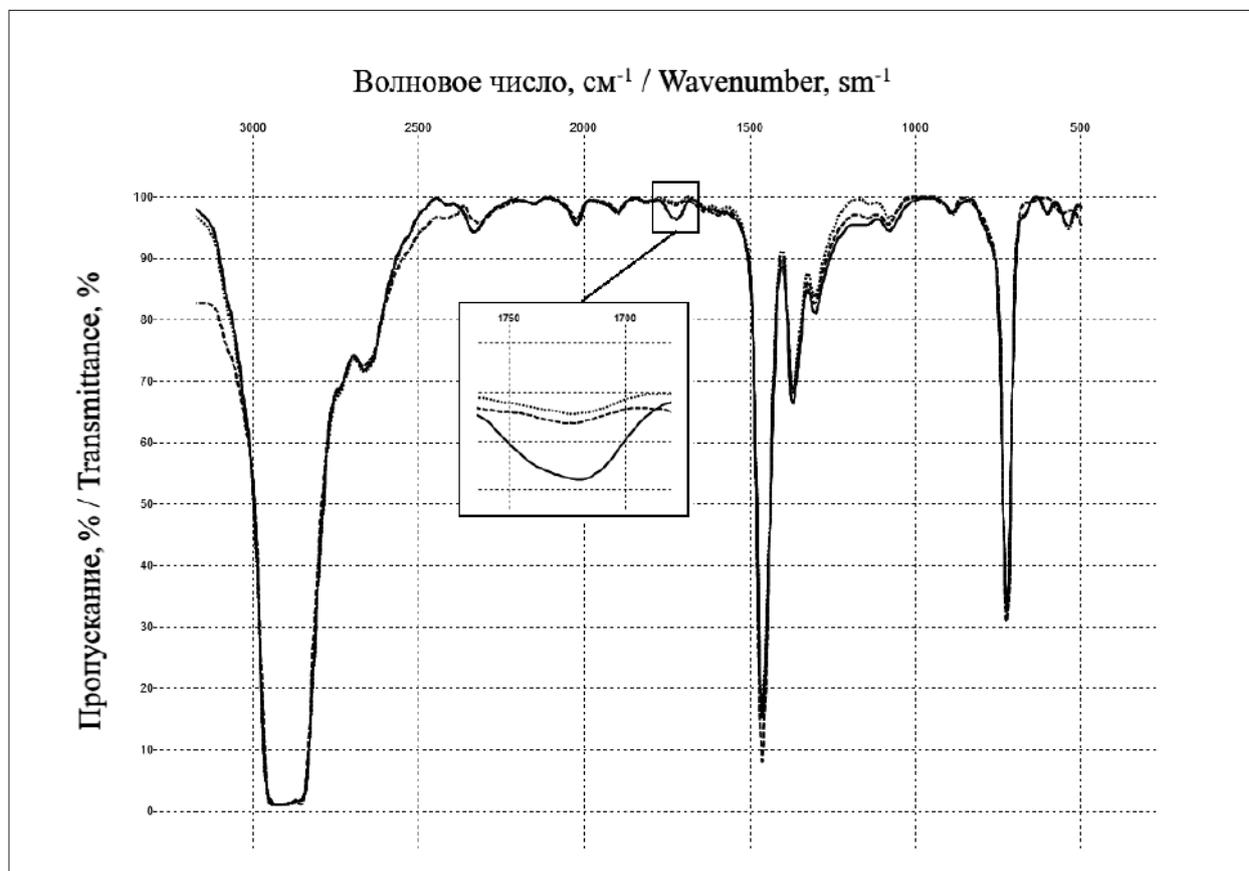


Рис. 3. ИК-спектры образцов из ПЭ после выдержки их в почве (....) и на воздухе (—) на сроке 12 месяцев по сравнению с исходным образцом (---)
Fig 3. IR-spectrum of polymer samples (PE) after exposure in soil (....) and air (—) for 12 months compared with the original sample (---)

Таблица 1 / Table 1

Температуры убыли 10% массы для образцов из ПКЛ и ПЭ, находившихся в почве и на воздухе в течение различного времени
 Temperature of 10% weight loss for PCL and PE samples exposure in soil and air for various times

Образец Sample	Продолжительность выдержки в среде, месяцы Time of exposure, month				
	0	3	6	9	12
Почва / Soil					
ПКЛ / PCL	349,80	339,94	341,07	337,18	335,04
ПЭ / PE	312,08	313,00	314,37	312,76	313,64
Воздух / Air					
ПКЛ / PCL	349,80	344,95	340,19	338,12	337,73
ПЭ / PE	312,08	305,16	303,13	302,89	301,07

Примечание: разрешение сигнала при анализе 0,1 мкг.
 Note: Analysis signal resolution 0.1 μg.

Результаты анализа представлены в таблице 1.

Как можно видеть, для образцов из ПКЛ, выдержанных как в почве, так и на воздухе, с увеличением продолжительности выдержки значения показателя T_{10} снижаются, что косвенно может свидетельствовать об уменьшении молекулярной массы образцов.

Для образцов из ПЭ с увеличением времени выдержки на воздухе значение показателя T_{10} также снижается. Данный факт согласуется с выявленным ранее с помощью ИК-спектроскопии протеканием процесса окисления.

Для образцов из ПЭ, выдержанных в почве, существенных изменений в значениях

Таблица 2 / Table 2

Индекс токсичности почвы / Toxicity index of soil

Образец Sample	Продолжительность выдержки в почве, месяцы Time of exposure in the soil, month			
	3	6	9	12
ПКЛ / PCL	0,96	1,06	0,88	1,08
ПЭ / PE	0,96	1,05	0,93	1,09

показателя T_{10} не установлено. Данный факт, наряду с отсутствием достоверных изменений в массе образцов ПЭ при выдержке их в почве, может свидетельствовать о стойкости ПЭ в указанной среде.

Исследование грибостойкости полимерных плёнок подтвердило нестойкость ПКЛ к разрушению микромицетами. Следует отметить, что незначительный прирост биомассы гриба в среде с ПЭ всё-таки наблюдали. Несмотря на это, при визуальном осмотре внешние изменения плёнок из ПЭ отсутствовали. В случае с ПКЛ плёнка пожелтела и частично расслоилась.

Важным аспектом при исследовании деградации полимеров в почве является её токсикологическая оценка с целью определения безопасности продуктов деструкции для окружающей среды. Фитотестирование почвы, в которых выдерживались полимеры, позволило сделать заключение об отсутствии существенного влияния данного фактора (ИТФ = 0,91–1,10) за исследуемый период времени на развитие тест-культуры (табл. 2).

Исключение составили пробы почвы, в которых находился ПКЛ в течение 9 месяцев. В этом случае регистрировали более низкое значение показателя ИТФ (0,88). Однако уровень влияния исследуемого фактора на развитие растений в этом случае оценивался как низкий (ИТФ = 0,71–0,90).

Заключение

Для образцов из ПКЛ отмечаются изменения как при выдержке на воздухе, так и в почве. Они сопровождаются снижением молекулярной массы, что косвенно подтверждено данными термогравиметрии. При выдержке на воздухе значительной потери массы образцов не отмечалось (менее 1% за 12 месяцев), в отличие от выдержки в почве (более 6% за 12 месяцев). Полученные результаты согласуются с данными, представленными в литературе. На поверхности образцов из ПКЛ, выдерживаемых в почве, визуализировали появление пятен, что свидетельствовало о колонизации материала почвенными микро-

организмами. На биodeградацию ПКЛ в почве указывала и большая по сравнению с ПЭ численность микромицетов. Её рост, предположительно, связан с наличием в среде источника питания, возникающего в результате деградации ПКЛ. При этом показано, что продукты деградации ПКЛ на данном сроке наблюдений не фитотоксичны.

Для образцов из ПЭ, взятых в качестве образцов сравнения для ПКЛ, достоверные изменения выявлены только при выдержке на воздухе: отмечали признаки протекания окислительного процесса. При выдержке в почве фиксировали устойчивость к деградации ПЭ на всём сроке наблюдений.

Таким образом, несмотря на подтверждённую способность ПКЛ к деградации в почве и на воздухе нельзя ожидать, что поведение полимера в окружающей среде будет аналогично лабораторным условиям. В естественной среде действует большое количество факторов (интенсивность солнечного света, температура, наличие кислорода, микробиологический состав почвы и др.), способных ускорить процесс его разложения.

References

1. Sanjay A.M., Sharma K.A. Handbook of applied biopolymer technology: Synthesis, degradation and applications. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2011. 482 p.
2. Ikada Y., Tsuji H. Biodegradable polyesters for medical and ecological applications // *Macromolecular Rapid Communications*. 2000. V. 21. No. 3. P. 117–132. doi: 10.1002/(SICI)1521-3927(20000201)21:3<117::AID-MARC117>3.0.CO;2-X
3. Woodruff M.A., Hutmacher D.W. The return of a forgotten polymer – Polycaprolactone in the 21st century // *Progress in Polymer Science*. 2010. V. 35. No. 10. P. 1217–1256. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002
4. Rudnik E. Compostable polymer materials. Second Edition. Elsevier, 2019. 410 p. doi: 10.1016/C2012-0-07075-5
5. Bartnikowski M., Dargaville T.R., Ivanovski S., Hutmacher D.W. Degradation mechanisms of polycaprolactone in the context of chemistry, geometry and environment // *Progress in Polymer Science*. 2019. V. 96. P. 1–20. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.05.004

6. Ponjavic M., Nikolic M.S., Runic J.N., Jeremic S., Stevanovic S., Djonlagic J. Degradation behaviour of PCL/PEO/PCL and PCL/PEO block copolymers under controlled hydrolytic, enzymatic and composting conditions // *Polymer Testing*. 2017. V. 57. P. 67–77. doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.11.018
7. Degradable aliphatic polyesters. *Advances in polymer science* / Ed. A.C. Albertsson. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. 188 p.
8. Tepper E.Z., Shilnikova V.K., Pereverzeva G.I. Workshop on microbiology. Moskva: Drofa, 2005. 256 p. (in Russian).
9. Petukhov D.V., Tovstik E.V., Bakulina A.V., Sazanova M.L., Burkov A.A. Soil *Streptomyces* sp. strain 2K1: phylogenetic position, effect on *Fusarium proliferatum* growth // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 111–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-111-116
10. ISO 11269-1. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth. 16 p.
11. ISO 11269-2. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher plants. 19 p.
12. Kabirov R.R., Sagitova A.R., Sukhanova N.V. Development and use of a ulticomponent test system for assessing the toxicity of the soil cover of an urban area // *Ekologiya*. 1997. No. 6. P. 45–48 (in Russian).
13. Chinaglia S., Tosin M., Degli-Innocenti F. Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level // *Polymer Degradation and Stability*. 2018. V. 147. P. 237–244. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.12.011
14. Gambarini V., Pantos O., Kingsbury J.M., Weaver L., Handley K.M., Lear G. Phylogenetic distribution of plastic-degrading microorganisms // *ASM Journals mSystems*. 2021. V. 6. No. 1. Article No. e01112-20. doi: 10.1128/mSystems.01112-20
15. Göpferich A. Mechanisms of polymer degradation and erosion // *Biomaterials*. 1996. V. 17. No. 2. P. 103–114. doi: 10.1016/0142-9612(96)85755-3
16. Oha J.Y., Oh Y.R., Kim D.M., Eom G.T., Song J.K. Screening and efficient production of engineered lipase B from *Candida antarctica* for eco-friendly recycling of waste polycaprolactone // *Polymer Degradation and Stability*. 2022. V. 195. Article No. 109807. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109807
17. Brown D., Floyd A., Sainsbury M. *Organic spectroscopy*. Moskva: Mir, 1992. 300 p. (in Russian).
18. Pretsch E., Bulmann F., Affolter K. *Structure determination of organic compounds*. Moskva: Mir, 2006. 438 p. (in Russian).

Местные штаммы стрептомицетов в защите гороха (*Pisum sativum* L.) от вредоносных инфекций

© 2022. И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., г. н. с., профессор,
И. В. Лыскова¹, к. с.-х. н., с. н. с., Я. И. Назарова¹, к. б. н., н. с.,
Т. П. Градобоева¹, к. б. н., с. н. с., С. С. Пислегина¹, н. с.,
Н. А. Боков^{1,2}, магистрант, Р. И. Абубакирова¹, м. н. с.,

¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

²Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: irgenal@mail.ru

Биологический азот в современном растениеводстве приобрёл особое значение в связи с общемировой проблемой дефицита белка и необходимостью ресурсосбережения. Горох посевной (*Pisum sativum* L.) – один из важнейших источников биологического азота в Северном Поволжье. Значительный ущерб продуктивности гороха наносят грибные заболевания. Система мероприятий по защите гороха от болезней включает предпосевное протравливание семян, а в период вегетации – опрыскивание посевов каждые 2–3 недели химическими фунгицидами, что влечёт ухудшение экологической обстановки и качества растительной продукции. Биологические фунгициды для применения на горохе в настоящее время не зарегистрированы. В работе проведена экспериментальная проверка способности местных штаммов *Streptomyces castelarensis* A4 (МК784817) и *Streptomyces antimycoticus* 8A1-3 (MT114717) ограничивать поражение гороха грибными инфекциями в результате предпосевной обработки семян. Установлена эффективность *S. antimycoticus* 8A1-3 в подавлении возбудителей корневых гнилей и фузариозного увядания, *S. castelarensis* A4 – в подавлении аскохитоза. Оба местных изолята стрептомицетов в сравнении с биологическим эталонным препаратом (Псевдобактерин-2) продемонстрировали более высокую эффективность в защите гороха от этих заболеваний. Преимущество перед биопрепаратами химического фунгицида Пионер установлено только в защите гороха от аскохитоза. Дополнительное опрыскивание биологическими фунгицидами вегетирующих растений способствовало повышению урожайности гороха.

Ключевые слова: биофунгициды, фузариозное увядание, корневые гнили, аскохитоз, бактериоз семян, *Streptomyces*.

Local strains of actinobacteria protect peas (*Pisum sativum* L.) from harmful infections

© 2022. I. G. Shirokikh^{1,2} ORCID: 0000-0002-3319-2729, I. V. Liskova¹ ORCID: 0000-0002-1079-3513,
Ya. I. Nazarova¹ ORCID: 0000-0002-2945-5282, T. P. Gradoboeva¹ ORCID: 0000-0002-8712-3083,
S. S. Pislegina¹ ORCID: 0000-0003-0553-7707, N. A. Bokov^{1,2} ORCID: 0000-0002-1000-1192,
R. I. Abubakirova¹ ORCID: 0000-0002-8526-2733

¹Federal Scientific Agricultural Center of the North-East,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: irgenal@mail.ru

Biological nitrogen in modern crop production has acquired special importance in connection with the global problem of protein deficiency and the need for resource conservation. Peas (*Pisum sativum* L.) is one of the most important sources of biological nitrogen in the Northern Volga region. Significant damage to the productivity of peas is caused by fungal diseases. The system of measures to protect peas from diseases includes pre-sowing seed treatment, and during the growing season – spraying of crops once every 2–3 weeks with chemical fungicides, which leads to deterioration of the ecological situation and the quality of plant products. Biological fungicides for use on peas are not currently registered. The paper conducted an experimental test of the ability of local strains of *Streptomyces castelarensis* A4 (МК784817) and *Streptomyces antimycoticus* 8A1-3 (MT114717) to limit the damage of peas by fungal infections as a result of pre-sowing seed treatment. The effectiveness of *S. antimycoticus* 8A1-3 in suppressing pathogens of root rot and fusarium

wilt, *S. castelarensis* A4 – in suppressing ascochitosis has been established. Both local isolates of streptomycetes, in comparison with the biological reference drug (Pseudobacterin-2), demonstrated higher efficiency in protecting peas from these diseases. The advantage over biological preparations of the chemical fungicide Pioneer is established only in the protection of peas from ascochitosis. Additional spraying with biological fungicides of vegetative plants contributed to an increase in the yield of peas.

Keywords: biofungicides, fusarium wilt, root rot, ascochitosis, bacteriosis of seeds, *Streptomyces*.

Интенсивные агротехнологии в растениеводстве зачастую приводят к загрязнению природной среды и подавлению механизмов её саморегуляции, что, в свою очередь, ведёт к угнетению растений и почвенной микробиоты, не обеспечивает эффективного увеличения урожайности. Для преодоления неблагоприятной экологической обстановки, складывающейся в условиях интенсивного земледелия, необходимы принципиально новые подходы и стратегии [1]. В связи с этим повысился интерес к конструированию экологически сбалансированных высокопродуктивных и устойчивых агрофитоценозов, максимально приспособленных к местным природным условиям, чему в немалой мере способствуют биологический азот и широкое использование в защите растений биологических препаратов [2].

Биологический азот является одним из основных звеньев экологизации сельскохозяйственного производства, позволяя получать высокие стабильные урожаи и обеспечивать воспроизводство плодородия почв. Известно, что основной поставщик биологического азота в растениеводстве – бобовые травы и зернобобовые культуры. Однако в структуре посевных площадей бобовым отводится очень скромное место – приблизительно 10% в странах бывшего СНГ, а в США – 26% и более. По данным ФАО, в мировом производстве белка на долю зернобобовых культур приходится около 20%, в странах Восточной Европы – только 5% [1]. Традиционной для России зернобобовой культурой является горох, но и на его долю в стране приходится не более 2% от общего производства зерновых и зернобобовых культур [3]. Все возделываемые в настоящее время сорта гороха в той или иной степени поражаются болезнями. Наибольший вред гороху наносят аскохитоз, фузариозное увядание, корневые гнили различной этиологии и другие вызываемые фитопатогенными грибами заболевания [3–5]. Отмечается высокая вредоносность для гороха семенной инфекции. Заражённость семян в условиях Северного Поволжья может достигать 40%. При сильном поражении аскохитозом семена теряют 50–70% всхожести [3].

Система мероприятий по защите гороха от болезней включает в предпосевной пери-

од заблаговременное протравливание семян химическими фунгицидами, а в период вегетации опрыскивание посевов с интервалами 2–3 недели. Ассортимент зарегистрированных в Российской Федерации протравителей на горохе включает пока только пять препаратов: Максим, ТМТД, Виннер, Винцит и Скарлет. Для применения по вегетации изучено действие химических фунгицидов Винтаж, Титул Дуо, Аканто Плюс [6]. Несмотря на разнообразие биологических средств защиты растений, специализированные для применения на горохе биофунгициды на сегодняшний день в России отсутствуют, из-за чего в числе рекомендуемых отмечен только Фитоспорин М [7]. Преимущество биопрепаратов заключается в способности контролировать и восстанавливать природные механизмы почвенной супрессивности, решать проблему резистентности фитопатогенов к химическим пестицидам. К числу несомненных достоинств биологических препаратов относятся специфичность действия и высокая экологичность [2].

Цель работы – провести экспериментальную проверку способности местных штаммов стрептомицетов – продуцентов биофунгицидов ограничивать развитие возбудителей инфекций гороха.

Объекты и методы исследования

В работе были использованы ранее выделенные из ризосферы сельскохозяйственных растений на типичной для Северного Поволжья дерново-подзолистой почве (г. Киров) штаммы *Streptomyces castelarensis* A4 и *Streptomyces antimycoticus* 8A1-3. Нуклеотидные последовательности фрагмента гена 16S рРНК этих штаммов депонированы в NSBI с присвоением индивидуальных кодов доступа MK784817 и MT114717 соответственно. Антифунгальная активность местных изолятов стрептомицетов *S. castelarensis* A4 и *S. antimycoticus* 8A1-3 ранее была показана в работе [8].

Культуры стрептомицетов для получения лабораторных образцов биопрепаратов выращивали в жидкой овсяной среде на качалке (120 об./мин) в течение 5 сут при $t = 20 \pm 2$ °C до

получения плотности суспензии $4,5 \cdot 10^7$ колониобразующих единиц (КОЕ)/мл по посеву.

Для выяснения сортовой чувствительности культуры гороха к живым клеткам и метаболитам стрептомицетов использовали семена районированных и перспективных сортов: Фалёнский усатый, Фалёнский юбилейный, Вятч, Рябчик, Вита, Е-1250 и Е-483. Семена замачивали в разведённых водой (1 : 10 и 1 : 100) жидких культурах (ЖК) бактерий на 20 ч, после чего проращивали их в рулонной водно-бумажной культуре при $t = 20 \pm 2$ °С. В контроле семена замачивали в воде. В каждом варианте опыта закладывали в рулоны по 40 шт. семян гороха. Учитывали всхожесть, линейные размеры и воздушно-сухую биомассу проростков.

Полевую оценку эффективности лабораторных образцов биофунгицидов проводили в посевах гороха в селекционном севообороте Фалёнской селекционной станции – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. Предпосевной обработке были подвергнуты семена перспективных сортов гороха различных морфотипов: Фалёнский усатый, Фалёнский юбилейный и Е-483. Схема опыта: 1) контроль (без обработки); 2) фунгицид Пионер (флутриафол + тиабендазол) – химический препарат сравнения; 3) *S. castalarensis* А4; 4) *S. antimycoticus* 8А1-3; 5) Псевдобактерин-2 (*Pseudomonas aureofaciens* BS1393) – биологический препарат сравнения. Расход биопрепаратов, жидких (ж): 1 л/т семян, расход рабочей жидкости 10 л/т, замачивание на 3 ч, в контроле семена замачивали в воде. Обработку семян химическим фунгицидом Пионер осуществляли путём погружения семян в рабочую жидкость. Концентрированная суспензия (кс) – 1 л/т семян, расход рабочей жидкости 10 л/т. В вариантах 3, 4 и 5, наряду с протравливанием семян, на половине делянки дополнительно проводили опрыскивание растений в межфазный период «бутонизация – начало цветения». Обработка во время вегетации растений биопрепаратами – по инструкции к Псевдобактерину-2, ж – 1 л/га, расход рабочей жидкости 300 л/га [9].

Учётная площадь делянок в опыте 1 м², повторность трёхкратная, размещение делянок последовательное. Посев сеялкой ССФК-7, уборка – в фазу полной спелости вручную. Норма высева 1,2 млн всхожих семян на 1 га. Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая, сформированная на покровных суглинках. Агрохимическая характеристика на момент закладки опыта: $pH_{КС1}$ 4,6,

содержание подвижного фосфора составило 318 мг/кг почвы, обменного калия – 248 мг/кг почвы. Минеральные удобрения внесены под культивацию в дозе NPK (20 : 52 : 52 д. в.). Фитопатологическую оценку в посеве гороха проводили в соответствии с методическими рекомендациями [10, 11].

Статистическую обработку данных выполняли стандартными методами с использованием пакетов программ Microsoft Excel 8 и Statgraphics 18.

Результаты и обсуждение

Streptomyces – наиболее многочисленный по видовому составу род актинобактерий, представители которого продуцируют разнообразные по химической структуре и физиологической активности соединения, способные оказывать на живые организмы как положительное, так и отрицательное воздействие [12]. На первом этапе исследований, чтобы исключить возможность ингибирующего влияния на растения водорастворимых метаболитов исследуемых штаммов, изучали сортовую реакцию гороха на обработку семян ЖК стрептомицетов.

В условиях водно-бумажной культуры проростки сортов Е-483 и Е-1250 без предварительной обработки семян имели признаки поражения семенной инфекцией и характеризовались вследствие этого меньшими линейными размерами, биомассой и более низкой всхожестью по сравнению с проростками других исследуемых сортов в контрольном варианте. В результате замачивания семян в ЖК *S. castalarensis* А4 (1 : 10) у проростков Е-483 и Е-1250 показатели всхожести семян, сухой биомассы (табл. 1) и длины корня (рис. 1А) достоверно возросли по сравнению с необработанным контролем. Отмеченные положительные эффекты наблюдали и при использовании для замачивания семян ЖК *S. castalarensis* А4 в разведении 1 : 100. У других, без признаков поражения семенной инфекцией, сортов гороха между бактериализованными и контрольными проростками существенных различий по всхожести и морфометрическим показателям не выявлено.

Аналогичные данные получены и при обработке семян гороха ЖК *S. antimycoticus* 8А1-3, с той разницей, что этот стрептомицет не оказал существенного влияния на всхожесть семян (табл. 1), но способствовал увеличению средних размеров как корня, так и побега у поражённых семенной инфекцией проростков

Таблица 1 / Table 1

Реакция различных сортов гороха на обработку семян местными штаммами стрептомицетов
Reaction of different varieties of peas to seed treatment with local strains of streptomycetes

Вариант Variant	Streptomyces antimycoticus 8 A1-3			Streptomyces castelarensis A4				
	биомасса, г biomass, g	% от контроля % to control	всхожесть, % germinating capacity, %	% от контроля % to control	биомасса, г biomass, g	% от контроля % to control	всхожесть, % germinating capacity, %	% от контроля % to control
Фалёнский юбилейный / Falenskiy yubileynyy								
Контроль / Control	0,34±0,04	–	90,00±0,00	–	0,47±0,04	–	87,50±5,00	–
1 : 10	0,46±0,07	136,29	95,00±4,08	105,55	0,37±0,07	78,72	98,75±2,50	112,86
1 : 100	0,46±0,09	136,29	92,50±5,00	102,78	0,40±0,04	85,11	91,25±8,54	104,28
Фалёнский усагый / Falenskiy usatuy								
Контроль / Control	0,52±0,05	–	91,25±7,50	–	0,23±0,03	–	85,00±9,13	–
1 : 10	0,51±0,03	98,08	88,75±7,50	97,26	0,19±0,01	82,61	82,50±6,45	97,06
1 : 100	0,44±0,00	84,61	93,75±4,79	102,74	0,27±0,07	117,39	83,75±0,07	98,53
Вятич / Vyatich								
Контроль / Control	0,30±0,01	–	96,25±2,50	–	0,37±0,07	–	97,50±2,89	–
1 : 10	0,39±0,04	130,00	97,50±2,89	101,30	0,47±0,04	127,03	100,00±0,00	102,56
1 : 100	0,37±0,04	123,33	97,50±0,00	101,30	0,48±0,07	129,73	98,75±2,50	101,28
Рябчик / Ryabchik								
Контроль / Control	0,56±0,06	–	96,25±2,50	–	0,25±0,02	–	95,00±7,07	–
1 : 10	0,56±0,06	100,0	96,25±2,50	100,00	0,36±0,04	144,00	87,50±2,89	92,11
1 : 100	0,59±0,06	105,36	96,25±4,79	100,00	0,39±0,03	156,00	88,75±6,29	93,42
Е-483								
Контроль* / Control	0,30±0,02	–	82,57±2,89	–	0,14±0,01	–	53,75±4,79	–
1 : 10	0,56±0,05	186,67	90,00±7,07	108,99	0,22±0,03	157,14	92,50±2,89	172,09
1 : 100	0,38±0,03	126,67	78,75±4,79	95,17	0,25±0,02	178,57	90,00±5,77	167,44
Е-1250								
Контроль* / Control	0,28±0,02	–	71,25±8,54	–	0,23±0,04	–	68,75±9,46	–
1 : 10	0,34±0,02	121,43	81,25±4,79	114,03	0,38±0,04	165,22	93,75±7,50	136,36
1 : 100	0,31±0,01	110,71	82,50±6,45	115,79	0,35±0,05	152,17	86,25±8,54	125,45
Вита / Vita								
Контроль* / Control	0,33±6,05	–	81,25±4,79	–	0,27±0,05	–	83,75±6,29	–
1 : 10	0,56±0,02	169,70	96,25±2,50	118,46	0,35±0,04	129,63	90,00±4,08	102,56
1 : 100	0,34±0,04	103,03	82,50±5,00	101,54	0,25±0,03	92,59	83,75±8,54	100,00

Примечание / Note: * – семенная инфекция / seminal infection.

сортов Е-483 и Вита (рис. 1В). Разведение 1 : 100 ЖК *S. antimycoticus* 8А1-3 значительно ослабило положительное влияние стрептомицета на поражённые инфекцией проростки гороха. Морфометрические показатели, как и всхожесть, существенно не отличались от аналогичных показателей в контрольном варианте. У других неинфицированных сортов разница между подвергнутыми бактериализации *S. antimycoticus* 8А1-3 и контрольными растениями практически отсутствовала.

Полученные результаты не только свидетельствуют об отсутствии у бактерий *S. castalarensis* А4 и *S. antimycoticus* 8А1-3 фитотоксического действия, но и демонстрируют их способность стимулировать рост проростков гороха за счёт подавления возбудителей семенной инфекции.

На следующем этапе работы проводили полевую оценку эффективности предпосевной обработки семян и посевов гороха лабораторными образцами биопрепаратов на основе местных штаммов *S. castalarensis* А4 и *S. antimycoticus* 8А1-3. Погодные условия вегетационного периода в год проведения исследований (2021 г.) не способствовали сильному поражению сельскохозяйственных культур грибными заболеваниями. Тем не менее фитопатологическая оценка в посевах гороха выявила поражение растений корневыми гнилями, фузариозом и аскохитозом.

Достоверное по сравнению с контролем снижение (в среднем по трём сортам) показателей «развитие» и «распространение болезни» при поражении гороха корневыми гнилями

обеспечила обработка семян биопрепаратом на основе *S. antimycoticus* 8А1-3 (табл. 2).

Его эффективность в подавлении развития корневых гнилей была выше, чем у биологического препарата Псевдобактерин-2 и химического фунгицида Пионер. Клеточная суспензия *S. antimycoticus* 8А1-3 проявила наибольшую эффективность среди испытываемых препаратов и в защите гороха от фузариозного увядания. Незначительно уступал ему штамм *S. castalarensis* А4, который, кроме того, лидировал по эффективности в защите гороха от поражения листьев аскохитозными грибами. Достоверно, но в меньшей степени, уменьшали проявление этого заболевания и все другие исследуемые препараты. Лидером в защите гороха от поражения аскохитозом бобов стал химический фунгицид Пионер. Однако обработка семян штаммом *S. castalarensis* А4 также способствовала достоверному снижению распространения болезни в посевах по сравнению с необработанным контролем.

Несмотря на сокращение поражения грибными болезнями всех исследованных сортов, урожайность гороха в результате обработки семян фунгицидными препаратами изменялась несущественно, варьируя по вариантам опыта от 142 до 155 г/м², включая вариант обработки химическим фунгицидом. В вариантах, где, помимо предпосевной обработки семян, дополнительно проводилось опрыскивание биопрепаратами вегетирующих растений, урожайность каждого из взятых в исследование сортов достоверно возросла по сравнению с однократной обработкой (рис. 2).

Таблица 2 / Table 2

Поражение гороха грибными заболеваниями в зависимости от предпосевной обработки семян препаратами (среднее по трём сортам) / The defeat of peas by fungal diseases, depending on the pre-sowing treatment of seeds with preparations (average for three varieties)

Вариант обработки Treatment option	Корневые гнили Root rot		Фузариозное увядание Fusarium wilt		Аскохитоз Ascochitosis			
	1	2	1	2	бобы / beans		листья / leaves	
					1	2	1	2
Контроль / Control	38,44	94,64	18,83	48,52	12,88	45,93	10,1	48,87
Пионер / Pioneer	38,51	92,95	15,14*	40,22	5,33*	22,21*	6,52*	30,36*
А4	34,99	90,56*	12,15*	28,57*	11,72	36,29*	6,07*	27,24*
8А13	28,97*	85,97*	10,45*	28,80*	12,22	39,26	7,26*	34,08*
Псевдобактерин-2 Pseudobacterin-2	35,08	91,38	12,27*	30,52	11,93	41,11	7,92*	37,40*
НСР _{0,95} / SSD _{0,95}	3,46	3,32	3,62	8,42	3,5	8,68	1,84	8,62

Примечание: * – различия с контролем значимы; 1 – развитие болезни, %; 2 – распространение болезни, %.
Note: * – the differences with the control are significant; 1 – development of the disease, %; 2 – spread of the disease, %.

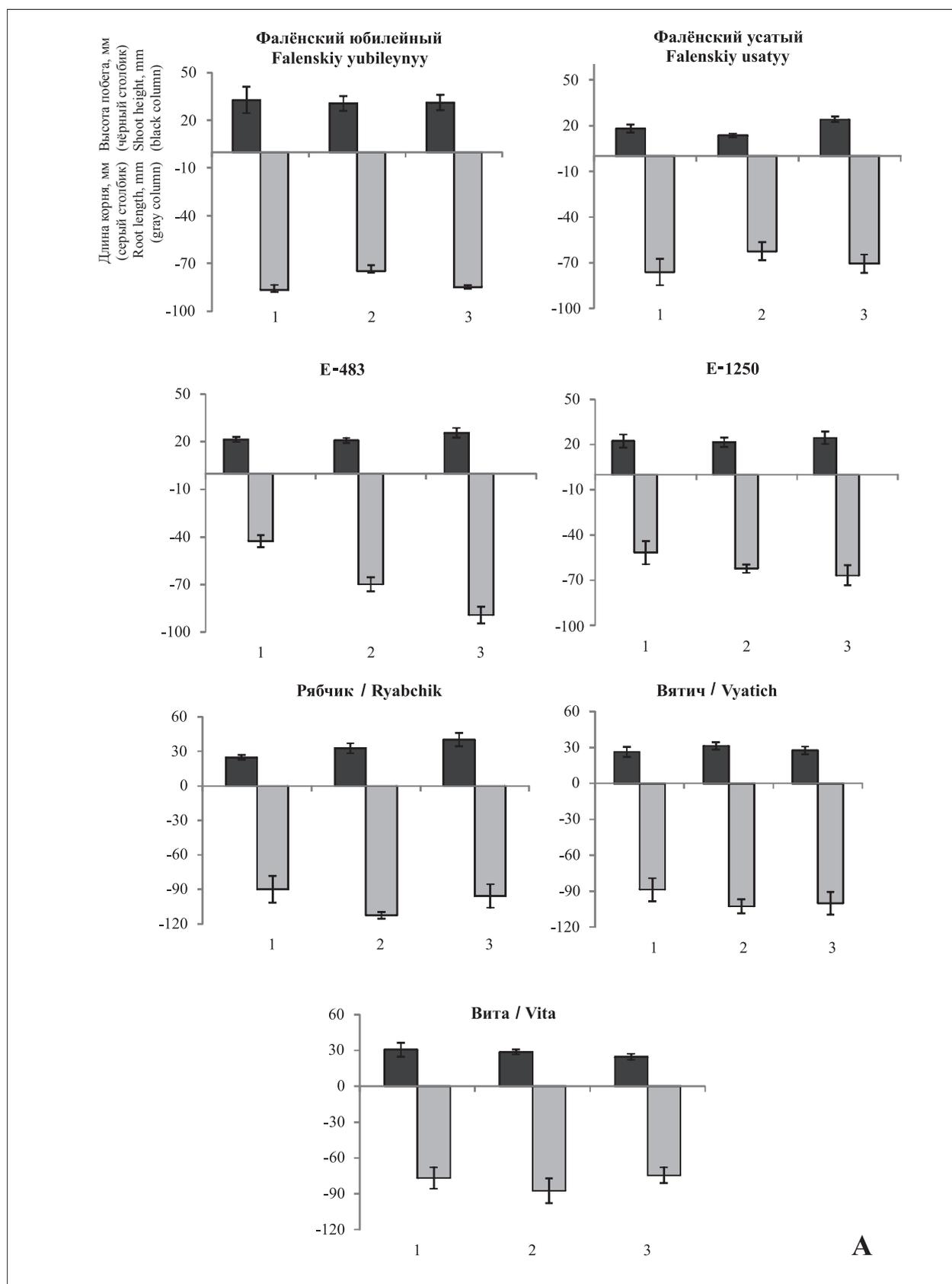


Рис. 1. Морфометрические показатели проростков разных сортов гороха после обработки семян *S. castalarensis* A4 (А) и *S. antimycoticus* 8A1-3 (В): 1 – контроль, 2 – ЖК 1 : 10; 3 – ЖК 1 : 100

Fig. 1. Morphometric indicators of seedlings after treatment of *S. castalarensis* A4 (A) and *S. antimycoticus* 8A1-3 (B): 1 – control, 2 – liquid culture (LC) 1 : 10; 3 – LC 1 : 100

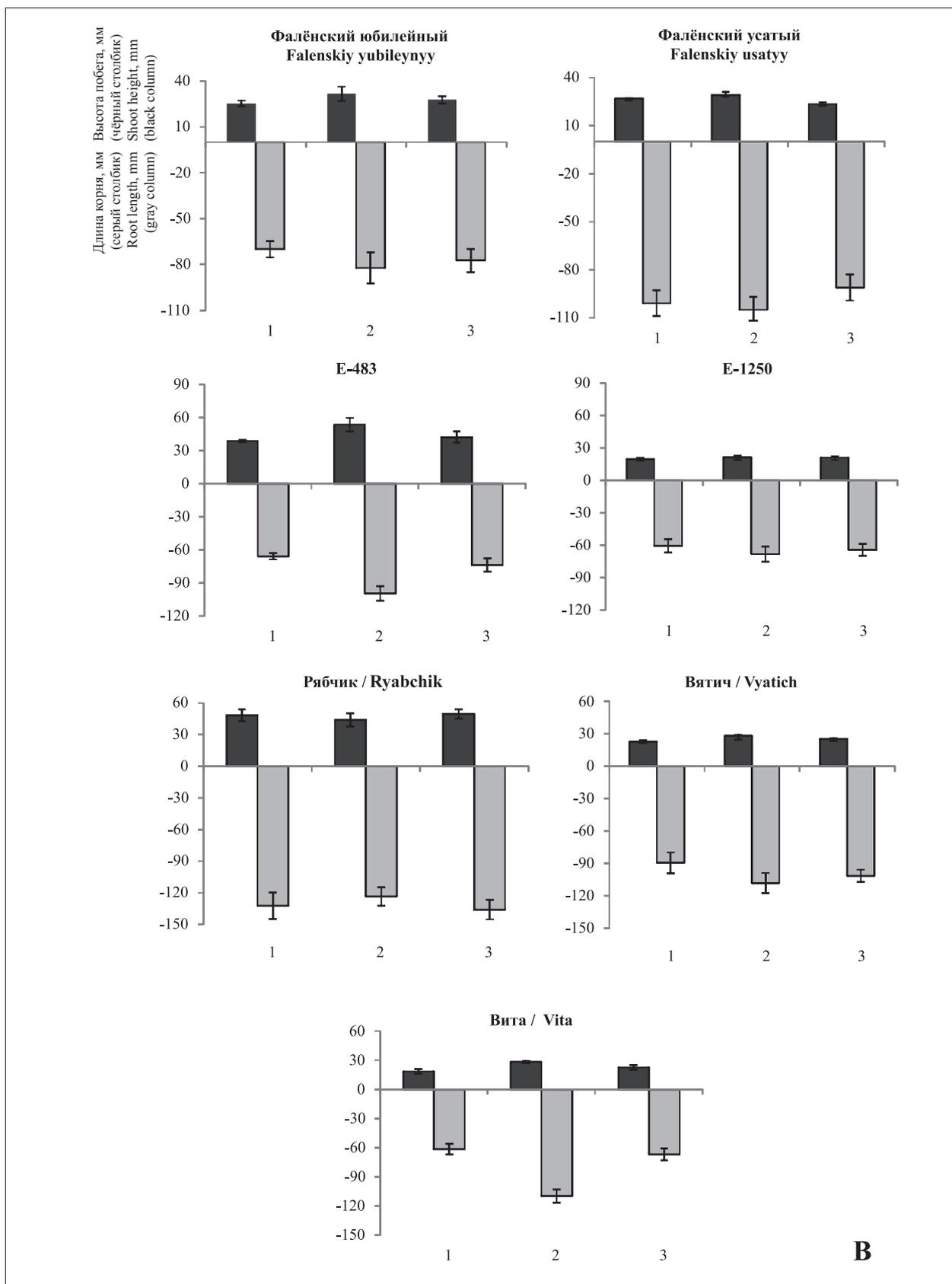


Рис. 1. Морфометрические показатели проростков разных сортов гороха после обработки семян *S. castalarensis* A4 (А) и *S. antimycoticus* 8A1-3 (В): 1 – контроль, 2 – ЖК 1 : 10; 3 – ЖК 1 : 100
Fig. 1. Morphometric indicators of seedlings different varieties after treatment of *S. castalarensis* A4 (A) and *S. antimycoticus* 8 A1-3 (B): 1 – control, 2 – liquid culture (LC) 1 : 10; 3 – LC 1 : 100

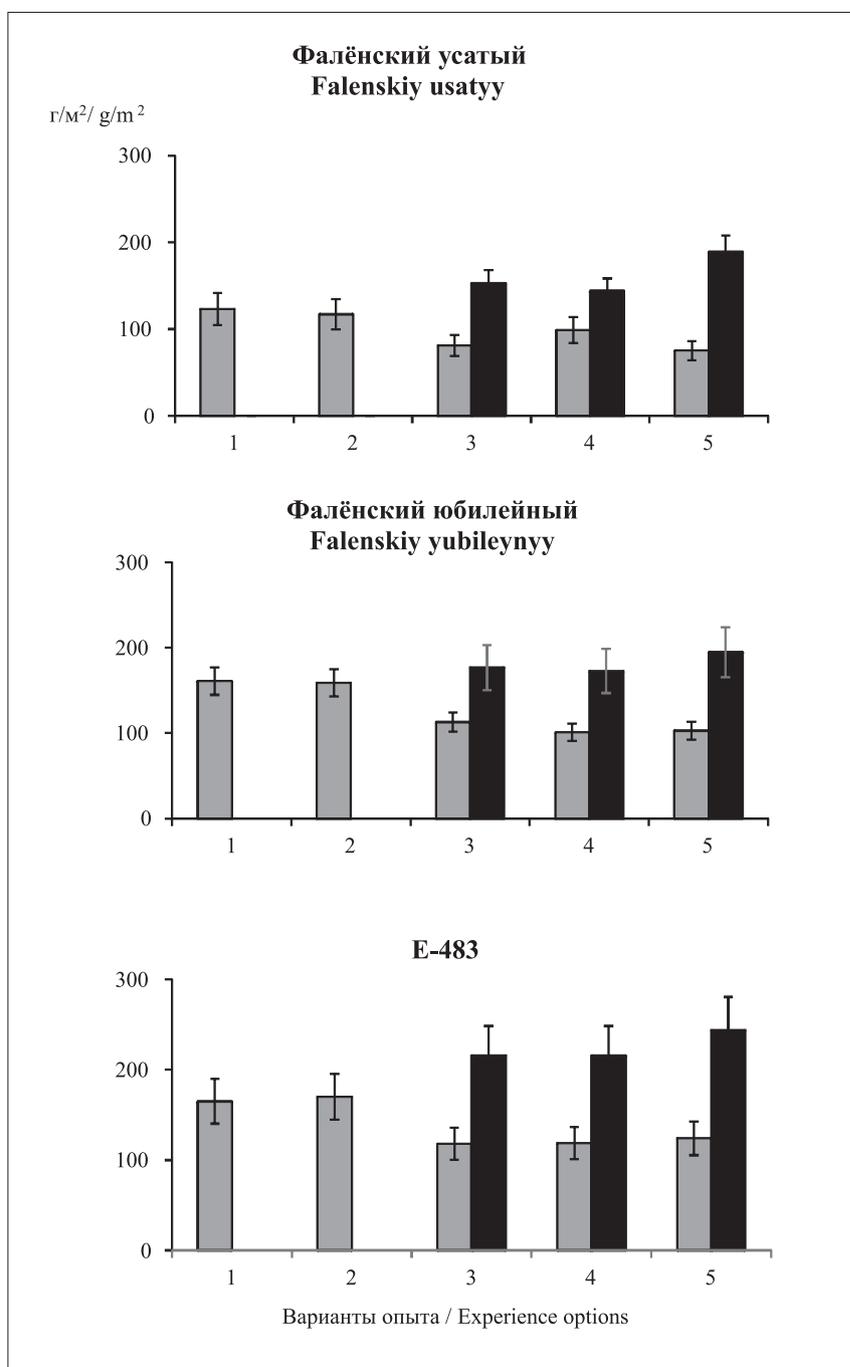


Рис. 2. Урожайность различных сортов гороха в зависимости от обработки семян и посевов препаратами: 1) контроль; 2) химический фунгицид Пионер; 3) *S. castalarensis* A4; 4) *S. antimycoticus* 8A1-3; 5) Псевдобактерин-2.

Обработка семян – серый столбик; обработка семян и посевов – чёрный столбик

Fig. 2. Yield of different varieties of peas depending on the treatment of seeds and crops with preparations: 1) control; 2) chemical fungicide Pioneer; 3) *S. castalarensis* A4; 4) *S. antimycoticus* 8A1-3; 5) Pseudobacterin-2. Seed treatment – gray column; seed and crop treatment – black column

Результаты трёхфакторного дисперсионного анализа данных также показали, что на варьирование урожайности гороха в опыте существенное влияние оказали количество обработок и генотип растения, причём вклад фактора «количество обработок» ($F = 77,32$;

$p \geq 0,95$) более чем в 3 раза превосходил вклад фактора «сорт» ($F = 22,99$; $p \geq 0,95$) (табл. 3). Вклад в варьирование урожайности взаимодействия факторов «препарат» × «количество обработок» оценивался как существенный ($p \geq 0,95$), тогда как сам по себе фактор «пре-

Таблица 3 / Table 3

Дисперсионный анализ влияния сорта, препарата защиты, количества обработок и их взаимодействия на урожайность гороха в микрополевым опыте. Фалёнки, 2021 г. / Dispersion analysis of the effect of the variety, the protection preparation, the number of treatments and their interaction on the yield of peas in a microfield experiment. Falenki, 2021

Источник варьирования / Source of variation	df	SS	F	p
Сорт (фактор А) / Variety (Factor A)	2	17874,7	22,99	< 0,0001*
Препарат (фактор В) / Medication (factor B)	4	516,9	0,66	0,6188
Количество обработок (фактор С) Number of treatments (factor C)	1	60114,2	77,32	< 0,0001*
Взаимодействие факторов АВ Interaction of AB factors	8	341,5	0,44	0,8926
АС	2	745,8	0,96	0,3889
ВС	4	10918,4	14,04	< 0,0001*
АВС	8	268,0	0,34	0,9446

Примечание: df – число степеней свободы, SS – сумма квадратов, F – критерий Фишера, p – уровень значимости. * Влияние на варьирование признака достоверно при $P \geq 0,95$.

Note: df – number of degrees of freedom, SS – sum of squares, F – Fisher criterion, p – significance level. * The effect on the variation of the trait is significant at $P \geq 0.95$.

парат» не оказал существенного влияния на урожайность гороха. Известно, что для защиты растений гороха от вредителей и патогенов часто требуются многократные обработки химическими средствами защиты [13, 14]. При этом увеличивается негативный эффект химических пестицидов для окружающей среды и качества растениеводческой продукции. Применение биофунгицидов лишено этого недостатка. Действующие агенты фунгицидных биопрепаратов, в частности местные изоляты бактерий *S. castalarensis* А4 и *S. antimycoticus* 8А1-3, являются компонентами природных ценозов, вследствие чего не причиняют вреда окружающей среде. Учитывая это преимущество, количество обработок в посевах гороха биопрепаратами можно без опасений увеличить в соответствии со складывающейся фитосанитарной обстановкой.

Полученные в полевом исследовании результаты позволили также определить спектр чувствительных к стрептомицетным метаболитам грибных мишеней. Так, для защиты гороха от возбудителей корневых гнилей и фузариозного увядания можно применять биопрепараты, изготовленные на основе того и другого местного изолята, однако наибольшей в этих случаях эффективностью обладает препарат на основе *S. antimycoticus* 8А1-3.

В защите гороха от аскохитоза, наоборот, более целесообразно применение препарата на основе *S. castalarensis* А4. В сравнении с эталонным биопрепаратом Псевдобактерин-2, обе исследованные культуры стрептомицетов продемонстрировали более высокую эффективность в защите гороха от поражения кор-

невыми гнилями, фузариозом и аскохитозом. Сравнение местных изолятов стрептомицетов с химическим фунгицидом Пионер выявило преимущество последнего только в защите растений от аскохитоза. Комбинированное или последовательное, в зависимости от сроков появления в посевах признаков поражения растений определённым заболеванием, применение *S. antimycoticus* 8А1-3 и *S. castalarensis* А4 будет способствовать не только снижению численности вредоносных грибов до экономически приемлемого уровня, но и оздоровлению экологической обстановки агроценоза.

Работа выполнена в рамках государственного задания FNWE-2022-0005 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы).

References

- Ivanov A.L. Scientific agriculture of Russia: results and prospects // *Zemledeliye*. 2014. No. 3. P. 25–29 (in Russian).
- Novikova I.I. Multifunctional biological products for phytosanitary optimization of agroecosystems in biological agriculture // *AgroEcoEngineering*. 2019. No. 2 (99). P. 183–194 (in Russian).
- Turina E.L., Didovich S.V., Kulinich R.A. The use of multifunctional biological products in the cultivation of legumes in the Crimea // *Zemledeliye*. 2015. No. 2. P. 31–33 (in Russian).
- Gradoboeva T.P. Infestation of pea seeds (*Pisum sativum* L.) by pathogenic microorganisms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 179–185 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-179-185

5. Budarina G.A., Zotikov V.I. Protection of peas // Appendix to the journal "Zashchita i karantin rasteniy". 2016. No. 1. P. 38(2)–56(20) (in Russian).
6. Laptiev A.B., Kungurtseva O.V. Prerequisites and fundamentals of chemical protection of peas from diseases // Zernobobovyye i krupyanyye kul'tury. 2016. No. 2 (18). P. 99–103 (in Russian).
7. Fungicides against rot on peas – 7 preparations [Internet resource] <http://propest.ru/catalog> (Accessed: 15.02.2022) (in Russian).
8. Shirokikh I.G., Nazarova Ya.I., Bakulina A.V., Abubakirova R.I. New strains of streptomyces as promising biofungicides // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 172–180 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-172-180
9. Pesticides.ru [Internet resource] https://www.pesticity.ru/pesticide/psevdobakterin-2zh/regulations_of_using (Accessed: 15.02.2022) (in Russian).
10. Ovchinnikova A.M., Andriukhina R.M., Azarova E.F. Methods of accelerated evaluation of the pea lecture material on infectious and provocative backgrounds (Methodological recommendations). Moskva: VNIIZBK, 1990. 23 p. (in Russian).
11. Putsa N.M., Razgulyaeva N.V., Kostenko N.Yu., Solozhentseva L.F. Methodological recommendations for studying the resistance of forage crops to fungal pathogens on artificial infectious field backgrounds. Moskva: VNIHK named V.R. Williams, 1999. 40 p. (in Russian).
12. Dyson P. Streptomyces // Encyclopedia of Microbiology / Ed. T.M. Schmidt. Fourth Edition. Academic Press, 2019. P. 334–345.
13. Chupak V.V., Pavlovskaya N.E., Gagarina I.N., Borzenkova G.A. Determination of overall toxicity plant protection from diseases based on buckwheat bioflavonoids // Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. No. 2 (53). P. 8–11 (in Russian).
14. Borodin D.B. Biotechnology of creation and application of new biological products in the technology of pea cultivation // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. No. 3 (52). P. 22–25 (in Russian).

Исследование влияния антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв

© 2022. А. Г. Космачева¹, аспирант, эколог,
С. М. Чеснокова¹, к. х. н., доцент, Т. А. Трифонова^{1,2}, д. б. н., профессор,
¹Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,
²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,
e-mail: hijadelaluna@mail.ru

Массовое использование антибактериальных препаратов в сельскохозяйственном производстве вызывает загрязнение окружающей среды и оказывает влияние на микробные сообщества экосистем, а также на выполняемые ими функции. Уреаза, участвующая в цикле азота, способствует расщеплению мочевины до аммиака, который является источником азотного питания растений и микроорганизмов. Объектами исследования являлись суглинистые дерново-подзолистая (Umbric Albeluvisols Abruptic) и серая лесная (Greyic Phaeozems Albic) почвы сельскохозяйственного назначения. В качестве поллютантов использовали антибиотики различных групп, отличающиеся по спектру воздействия и физико-химическим характеристикам: тилозин, бензилпенициллин, окситетрациклин. Уреазная активность дерново-подзолистой почвы без внесения антибиотиков составляла 0,951 г NH₃/10 г почвы за 24 ч, серой лесной – 1,178 г NH₃/10 г почвы за 24 ч. Результаты исследования демонстрируют преимущественно токсическое влияние антибиотиков на уреазную активность. Воздействие препаратов зависит как от их концентраций и свойств, так и от свойств и типа почв. Уреазная активность серой лесной почвы выше, чем дерново-подзолистой, и является более устойчивой к воздействию антибактериальных препаратов. Наибольшее токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь антибиотиков, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми ($p > 0,05$). Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности уреазы в дерново-подзолистой почве от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином, в серой лесной – от концентрации бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином ($p < 0,05$).

Ключевые слова: антибиотики, уреазная активность, дерново-подзолистая почва, серая лесная почва.

Study of the effect of antibiotics on the urease activity of sod-podzolic and gray forest soils

© 2022. A. G. Kosmacheva¹ ORCID: 0000-0002-1988-8615²
S. M. Chesnokova¹ ORCID: 0000-0001-5126-1786² T. A. Trifonova^{1,2} ORCID: 0000-0002-1628-9430²
¹Vladimir State University named after
Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs,
87, Gorky St., Vladimir, Russia, 600000,
²M. V. Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: hijadelaluna@mail.ru

Environmental pollution with antibacterial drugs is associated with their massive use, and can affect the microbial communities of ecosystems and their functions, which determines the relevance of the study of such effects. Urease participates in the nitrogen cycle, promotes the breakdown of urea to ammonia. Ammonia, in turn, is a source of nitrogen nutrition for plants and microorganisms. The objects of research were sod-podzolic (Umbric Albeluvisols Abruptic) and gray forest (Greyic Phaeozems Albic) agricultural soils. Antibiotics of various groups were used as pollutants, differing in the spectrum of action and physicochemical characteristics: tylosin, benzylpenicillin, oxytetracycline. The urease activity of the sod-podzolic soil without antibiotics was 0.951 g NH₃/10 g soil/24 hours, gray forest soil – 1.178 g NH₃/10 g soil/24 hours. The results of the study demonstrate the predominantly toxic effect of antibiotics on urease activity. The effect of drugs depends both on their concentrations and properties, and on the properties and type of soil. The urease activity of gray forest soil is higher than that of sod-podzolic soil, and is more resistant to the effects of antibacterial

drugs. A triple mixture of antibiotics had the greatest toxic effect on the urease activity of the sod-podzolic soil. Tylosin had the greatest toxic effect on the urease activity of the gray forest soil. However, these effects were not dose-dependent ($p > 0.05$). Significant negative correlations were established for dependences of the urease activity of sod-podzolic soil on the concentration of oxytetracycline and its mixture with tylosin, and the urease activity of gray forest soil on the concentration of benzylpenicillin and a mixture of oxytetracycline with tylosin ($p < 0.05$).

Keywords: antibiotics, urease activity, sod-podzolic soil, gray forest soil.

Антибиотики широко используются в медицине, ветеринарии и сельском хозяйстве для лечения и профилактики заболеваний, стимулирования роста и продуктивности животных. До 90% вводимых в организм антибактериальных препаратов выделяются с экскрементами, поступая в почвы вследствие применения навоза, сточных муниципальных вод и их осадков для удобрения и орошения сельскохозяйственных земель [1–3]. Концентрации антибиотиков в наземных экосистемах варьируются от нескольких нг/кг до сотен мг/кг и зависят от свойств и продолжительности использования [1–5].

При попадании в окружающую среду антибиотики способны оказывать воздействие на микробные сообщества экосистем благодаря своим бактерицидным и бактериостатическим свойствам. К настоящему времени исследовано воздействие антибактериальных препаратов различных групп на структурное, функциональное, генетическое разнообразие и обилие почвенных микроорганизмов (МО), а также на осуществляемые ими процессы [2–13].

В связи с тем, что ключевую роль в поддержании гомеостаза почвы играют ферментативные процессы, осуществляющие круговорот веществ и энергии и определяющие её биологическую активность, активность ферментов используется в диагностике состояния и экологическом мониторинге почв, является важным биоиндикатором реакции МО на воздействие антибиотиков [2, 14]. Наибольшее значение для исследований представляют ферменты классов гидролаз и оксидоредуктаз, особенно связанные с циклами углерода и азота [14].

Уреаза (карбамид-аминогидролаза) – фермент, участвующий в цикле азота, расщепляющий связи между углеродом и азотом мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, а также предотвращающий изомеризацию карбамида в цианат аммония, токсичный для растений. Мочевина поступает в почву в составе азотных удобрений, навоза, растительных остатков и образуется в процессе биохимических превращений. Аммиак, в свою очередь, является источником азотного

питания растений и МО. Активность уреазы служит диагностическим показателем способности почвы накапливать минеральный азот. Высокая активность фермента может приводить к повышению реакции почвенной среды из-за накопления ионов аммония, следствием чего являются потери азота в составе аммиака [14, 15]. Уровень уреазной активности и распределение по профилю зависят от генетических особенностей почвы, её химических и физических свойств, механической обработки [14].

В настоящее время опубликованы исследования о влиянии антибиотиков окситетрациклина, хлортетрациклина, сульфамида, сульфаметазина, сульфадиазина, смеси сульфаниламидных антибиотиков (сульфадиметоксина, сульфаметоксазола, сульфаметазина), тилозина и ампициллина на уреазную активность различных почв [6–12]. Показано, что изменения активности уреазы в почвах, обработанных окситетрациклином, соответствовали изменению микробной биомассы. Культивируемые растения снижали токсический эффект антибиотиков [6]. Повышение уреазной активности при обработке антибиотиками демонстрировало возможность почвенной микрофлоры использовать внесённые препараты в качестве источника углерода [8]. Установлено, что растворённое органическое вещество навоза и хлортетрациклин оказывали противоположное воздействие на уреазную активность почвы: органическое вещество стимулировало активность фермента, добавление антибиотика ингибировало его [7]. Более устойчивой к воздействию сульфаметазина оказалась почва, имеющая более высокую уреазную активность, величину pH, содержание органического углерода и азота, численность МО [9]. Добавление сульфаниламидов ингибировало уреазную активность почв [11].

В ранее опубликованных нами работах установлено токсическое воздействие тилозина, ампициллина и их смеси на уреазную активность дерново-подзолистой супесчаной слабокультуренной почвы в модельном лабораторном эксперименте [12], а также бензилпенициллина (концентрация 200 мг/кг),

окситетрациклина, тилозина на уреазную активность дерново-подзолистой легкосуглинистой пахотной почвы [13].

Целью данной работы являлось изучение и сравнение воздействия антибиотических препаратов разных групп (тилозина, окситетрациклина, бензилпенициллина) в широком диапазоне концентраций (50–700 мг/кг) на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной суглинистых почв методом модельных лабораторных исследований.

Актуальность работы обусловлена тем, что изменение активности уреазы при загрязнении антибиотиками может быть причиной нарушения азотного цикла почвы и может привести к потере плодородия основных пахотных почв Владимирской области – дерново-подзолистых и серых лесных.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись суглинистые дерново-подзолистая (Umbric Albeluvisols Abruptic) (56°4,783'N, 40°34,850'E) и серая лесная (Greyic Phaeozems Albic) (56°25,83'N, 40°23,17'E) почвы [16], образцы которых отобраны в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 на сельскохозяйственных участках во Владимирской области. Выбор типов почв обусловлен преобладанием их на сельскохозяйственных угодьях во Владимирской,

а также в соседних Ивановской и Ярославской областях. В целом на пашне Верхневолжского региона на них приходится 305 тыс. га [14]. Поскольку наиболее высокие значения активности изучаемого фермента были выявлены в гумусовом горизонте [14], образцы отбирали из верхнего слоя почвы с глубины 0–20 см.

В качестве поллютантов использовали антибиотики различных групп, отличающиеся по спектру воздействия и физико-химическим характеристикам.

Тилозин, относящийся к группе макролидов, подавляет развитие грамположительных и некоторых грамотрицательных бактерий, оказывая бактериостатическое действие, способен проявлять бактерицидные свойства в высоких концентрациях [17]. В эксперименте тилозин применялся в лекарственной форме раствора для инъекций с концентрацией действующего вещества 200 мг/см³. Окситетрациклин, относящийся к группе тетрациклиновых антибиотиков, имеет широкий спектр действия против грамположительных и грамотрицательных бактерий, проявляет бактериостатическое действие, при увеличении концентрации способен оказывать и бактерицидное действие. Бензилпенициллин, относящийся к группе β-лактамовых антибиотиков, эффективен против грамположительных организмов, проявляя бактерицидные и бактериостатические

Таблица 1 / Table 1

Агрохимические показатели исследуемых почв
Agrochemical indicators of the studied soils

Показатели, единица измерения Indicators, unit of measurement	Значения показателей Values of indicators		Методика исследования Method of determination
	дерново-подзолистая почва sod-podzolic soil	серая лесная почва gray forest soil	
Кислотность солевой вытяжки, pH _{KCl} Acidity, pH _{KCl}	5,6±0,2	6,8±0,2	ГОСТ 26483-85 GOST 26483-85
Органическое вещество (гумус), % Organic matter, %	2,4±0,5	4,0±0,6	ГОСТ 26213-91 GOST 26213-91
Азот аммиачный, мг/кг N-NH ₄ ⁺ , mg/kg	0,0	0,48±0,07	ГОСТ 26489-85 GOST 26489-85
Азот нитратный, мг/кг N-NO ₃ ⁻ , mg/kg	10,1±1,5	2,4±0,7	ГОСТ 26951-86 GOST 26951-86
Содержание физической глины, % Physical clay, %	30,2±3,0	35,5±3,6	ГОСТ 12536-2014 GOST 12536-2014

свойства [17]. Используемые препараты окситетрациклина гидрохлорид и бензилпенициллина натриевая соль представляли собой порошки для приготовления инъекционного раствора в количестве 1 г, содержащие 1000000 ЕД активного вещества. Рабочие растворы антибиотиков для исследования готовили путём разбавления исходных препаратов в дистиллированной воде. В эксперименте использовали концентрации антибиотиков в дозах, соответствующих 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 мг/кг почвы, выбранные на основании литературных данных [4–5].

Уреазную активность почвы определяли фотокolorиметрическим методом по учёту количества аммиака, образующегося при гидролизе вносимой мочевины [15]. Контролем служила почва, стерилизованная в течение 3 ч при 180 °С и субстрат без почвы (3% раствор мочевины). Количество аммиака рассчитывали по предварительно составленной калибровочной кривой. Активность уреазы рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(a - b) \cdot p \cdot 10}{n}$$

где *A* – активность уреазы, мг NH₃/10 г почвы; *a* – количество аммиака в пробе по графику, мг; *b* – количество аммиака в контроле по графику, мг; *n* – навеска воздушно-сухой почвы, г; *p* – разведение [15].

Опыты проводили в трёх повторностях для каждой концентрации антибиотика.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программы Statistica 7.0. Был проведён корреляционный анализ зависимости показателя уреазной активности почвы от концентрации антибиотика (*p* < 0,05), рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. В качестве погрешности указаны значения стандартной ошибки среднего. Построение графиков осуществляли в программе Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Установлено, что уреазная активность дерново-подзолистой почвы без внесения антибиотиков составляла 0,951 г NH₃/10 г почвы за 24 ч, серой лесной – 1,178 г NH₃/10 г почвы за 24 ч, что характеризует обе исследуемые почвы как очень бедные по степени обогащённости уреазой [18].

Результаты корреляционного анализа зависимости уреазной активности дерново-подзолистой и серой лесной почв от концентрации антибиотиков представлены в таблице 2.

Полученные результаты демонстрируют уменьшение уреазной активности дерново-подзолистой почвы при внесении антибиотиков. Наибольшее снижение наблюдалось при воздействии тройной смеси антибактериальных препаратов, наименьшее – при внесении смеси окситетрациклина и тилозина (рис. 1, 2). Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности

Таблица 2 / Table 2
 Результаты корреляционного анализа зависимости уреазной активности почв от концентрации антибиотиков / Results of the correlation analysis of the dependence of the urease activity of soils on the concentration of antibiotics

Антибиотики Antibiotics	Коэффициент корреляции Пирсона (<i>r</i>) и критерия значимости (<i>p</i>) Pearson correlation coefficient (<i>r</i>), significance criteria value (<i>p</i>)	
	дерново-подзолистая почва / sod-podzolic soil	серая лесная почва / gray forest soil
Бензилпенициллин / Benzylpenicillin	<i>r</i> = -0,3337; <i>p</i> = 0,346	<i>r</i> = -0,6983; <i>p</i> = 0,025
Окситетрациклин / Oxytetracycline	<i>r</i> = -0,7525; <i>p</i> = 0,012	<i>r</i> = -0,1625; <i>p</i> = 0,654
Тилозин / Tylosin	<i>r</i> = -0,4443; <i>p</i> = 0,198	<i>r</i> = -0,3536; <i>p</i> = 0,316
Окситетрациклин + Бензилпенициллин Oxytetracycline + Benzylpenicillin	<i>r</i> = -0,5670; <i>p</i> = 0,087	<i>r</i> = -0,1594; <i>p</i> = 0,660
Бензилпенициллин + Тилозин Benzylpenicillin + Tylosin	<i>r</i> = -0,2160; <i>p</i> = 0,549	<i>r</i> = -0,0798; <i>p</i> = 0,827
Окситетрациклин + Тилозин Oxytetracycline + Tylosin	<i>r</i> = -0,7124; <i>p</i> = 0,021	<i>r</i> = -0,7240; <i>p</i> = 0,018
Окситетрациклин + Бензилпенициллин + Тилозин Oxytetracycline + Benzylpenicillin + Tylosin	<i>r</i> = -0,5432; <i>p</i> = 0,105	<i>r</i> = -0,0673; <i>p</i> = 0,853

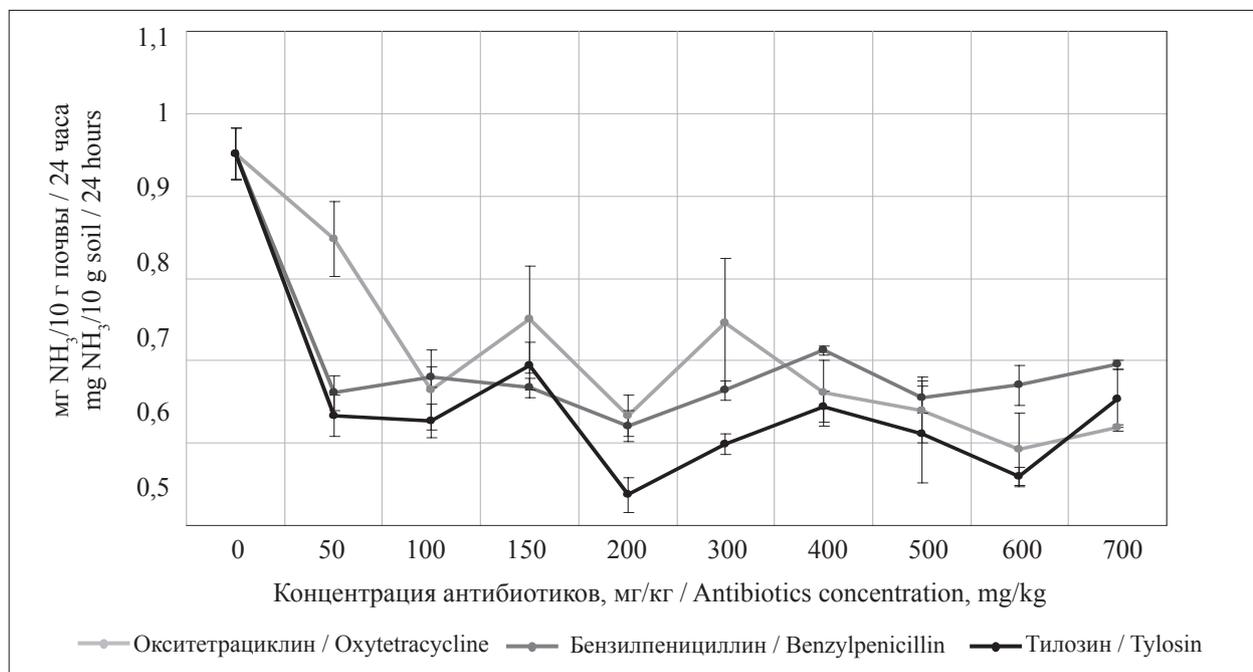


Рис. 1. Зависимость уреазной активности дерново-подзолистой почвы от концентрации внесённых антибиотиков при индивидуальном воздействии
Fig. 1. Dependence of the urease activity of the sod-podzolic soil on the concentration of introduced antibiotics under individual exposure

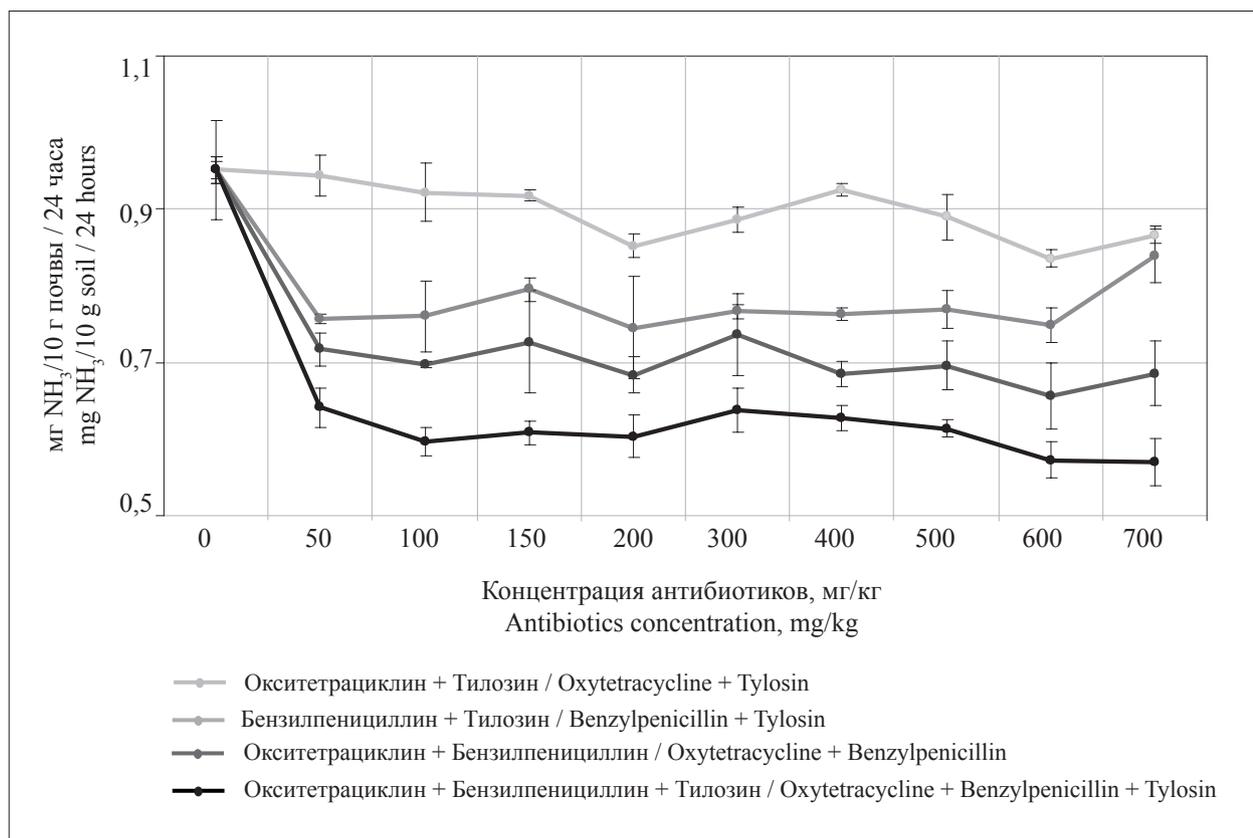


Рис. 2. Зависимость уреазной активности дерново-подзолистой почвы от концентрации внесённых антибиотиков при комбинированном воздействии
Fig. 2. Dependence of the urease activity of the sod-podzolic soil on the concentration of introduced antibiotics under combined exposure

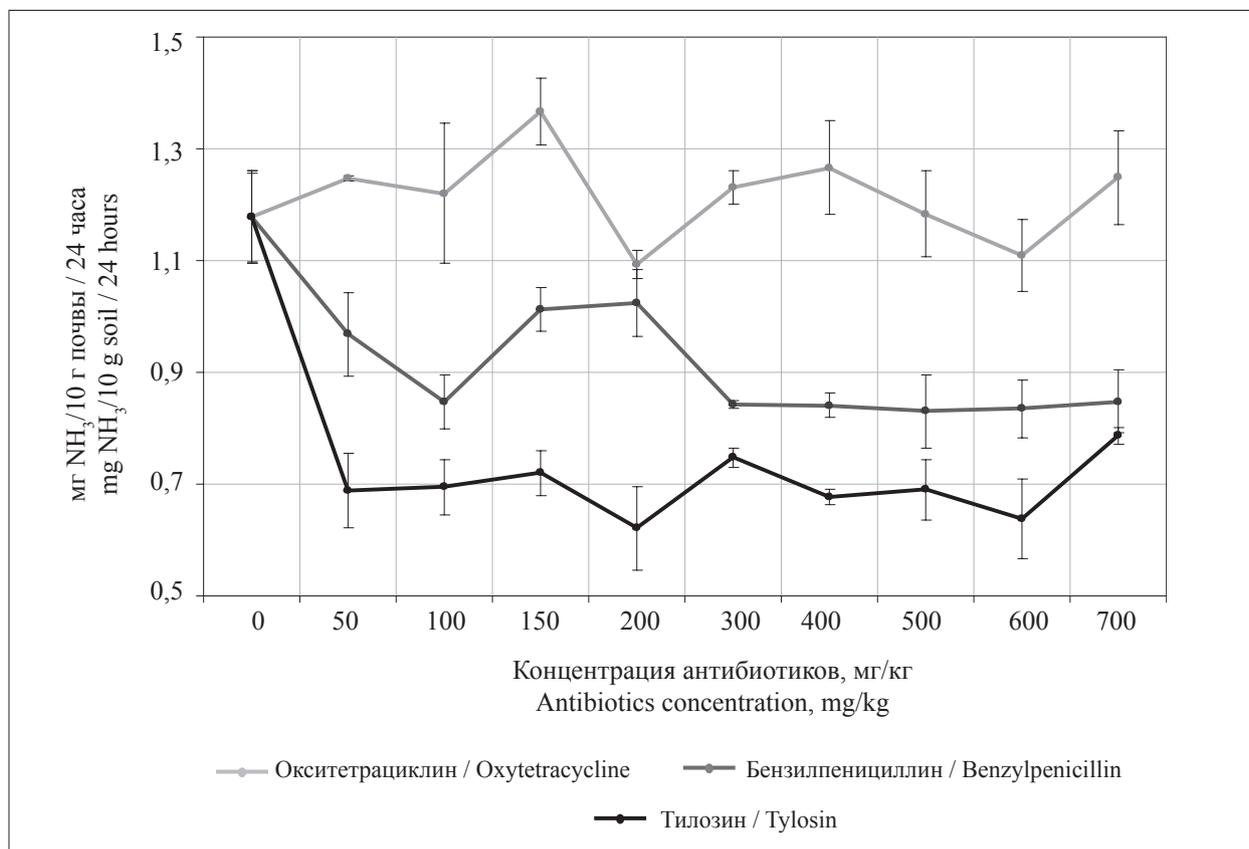


Рис. 3. Зависимость уреазной активности серой лесной почвы от концентрации внесённых антибиотиков при индивидуальном воздействии
Fig. 3. Dependence of the urease activity of the gray forest soil on the concentration of introduced antibiotics under individual exposure

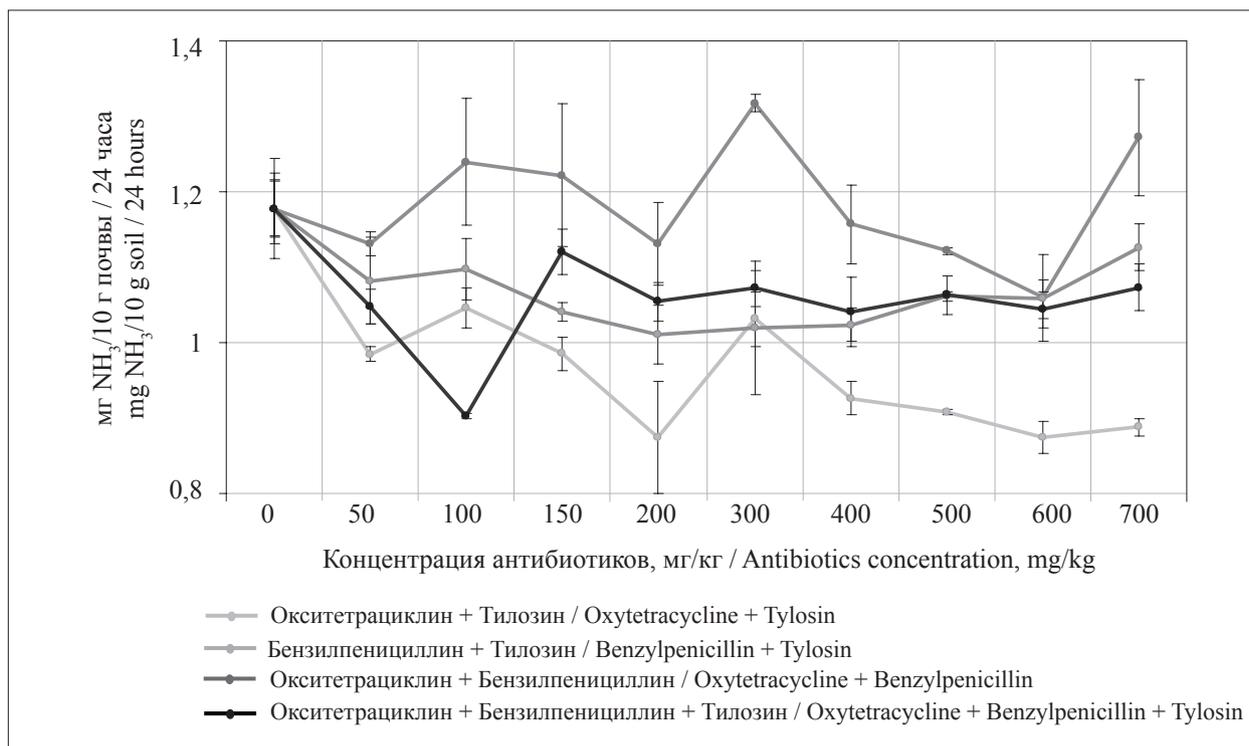


Рис. 4. Зависимость уреазной активности серой лесной почвы от концентрации внесённых антибиотиков при комбинированном воздействии
Fig. 4. Dependence of the urease activity of the gray forest soil on the concentration of introduced antibiotics under combined exposure

фермента от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином (табл. 2).

Выявлено снижение уреазной активности серой лесной почвы при загрязнении бензилпенициллином, тилозином, смесями окситетрациклина с тилозином, окситетрациклина с бензилпенициллином и тройной комбинации препаратов. Окситетрациклин, а также смесь бензилпенициллина с тилозином проявляли незначительное, как стимулирующее, так и ингибирующее воздействие в зависимости от применяемой концентрации (рис. 3, 4). Наибольшее токсическое влияние проявлялось при внесении тилозина, однако оно не являлось дозозависимым (табл. 2). Достоверная отрицательная корреляционная зависимость уреазной активности от концентрации препарата была установлена для бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином (табл. 2).

Установленная уреазная активность серой лесной почвы превышает данный показатель дерново-подзолистой почвы, что может быть связано с более высоким содержанием аммонийного азота (табл. 1), и, как следствие, с большим количеством почвенных МО, осуществляющих процесс разложения карбамида [14].

Результаты исследования демонстрируют преимущественно ингибирующее воздействие антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв, что совпадает с опубликованными данными [6–13]. Согласно ранее проведённым исследованиям структуры микробиома дерново-подзолистой почвы, загрязнённой 200 мг/кг бензилпенициллина, окситетрациклина и тилозина, ингибирование уреазной активности может быть связано с изменением содержания архей семейства Nitrososphaeraceae, которые способны использовать мочевины в качестве субстрата [13, 19].

Незначительное повышение активности уреазы серой лесной почвы при загрязнении окситетрациклином и смесью бензилпенициллина с тилозином соответствует литературным данным [6, 8] и может быть связано с возможностью почвенной микрофлоры использовать внесённые препараты в качестве источника углерода [8].

Наиболее сильное токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми (табл. 2).

Достоверные отрицательные корреляционные зависимости значения активности

уреазы от концентрации препаратов были установлены для окситетрациклина при добавлении к дерново-подзолистой почве, бензилпенициллина – к серой лесной, смеси окситетрациклина и тилозина – к обоим исследуемым почвам.

Сравнение результатов воздействия антибиотиков на исследуемые дерново-подзолистую и серую лесную почвы демонстрирует различный ответ на влияние препаратов. Уреазная активность серой лесной почвы выше и менее подвержена воздействию вносимых препаратов, что может быть связано с более высокими значениями pH, содержанием органического углерода и аммиачного азота (табл. 1) и соответствует литературным данным [9].

Ингибирование активности уреазы может привести к снижению содержания минерального азота, увеличению концентрации фитотоксичного цианата аммония, а повышение – к потерям азота из почвы в составе аммиака [14], поэтому результаты данного исследования имеют важное теоретическое и практическое значение.

Заключение

Впервые изучено влияние антибиотиков тилозина, окситетрациклина, бензилпенициллина в широком диапазоне концентраций (50–700 мг/кг почвы) на уреазную активность суглинистых дерново-подзолистой и серой лесной почв, как при индивидуальном, так и при комбинированном воздействии.

Результаты исследования демонстрируют преимущественно токсическое воздействие антибиотиков на уреазную активность исследуемых почв.

Наибольшее токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь антибиотиков, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми.

Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности уреазы в дерново-подзолистой почве от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином, в серой лесной – от концентрации бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином.

Ингибирование активности уреазы может привести к снижению содержания минерального азота, увеличению концентрации фитотоксичного цианата аммония, а повышение – к потерям азота из почвы в составе аммиака.

Воздействие антибактериальных препаратов зависит от их свойств и концентраций, а также от типа и свойств почв. Уреазная активность серой лесной почвы выше, чем дерново-подзолистой, и является более устойчивой к воздействию антибиотиков.

References

- Grenni P., Ancona V., Caracciolo A.B. Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review // *Microchemical Journal*. 2018. V. 136. P. 25–39. doi: 10.1016/j.microc.2017.02.006
- Cycoń M., Mroziak A., Piotrowska-Seget Z. Antibiotics in the soil environment – degradation and their impact on microbial activity and diversity // *Front. Microbiol.* 2019. V. 10. Article No. 338. doi: 10.3389/fmicb.2019.00338
- Van de Vijver L., Verwer C., Smolders G., Hospers-Brands M., van Eekeren N. The cycle of veterinary antibiotics in the ecosystem. Louis Bolk Institute, 2016. 31 p.
- Akimenko Y.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Influence of pollution by antibiotics on the biological properties of ordinary chernozem: monograph. Rostov-na-Donu: Southern Federal University Publ., 2015. 153 p. (in Russian).
- Akimenko Y.V., Chuvaraeva O.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Minnikova T.V. Assessment of the ecological state of the main soils of the south of Russia under conditions of antibiotic contamination: monograph. Rostov-na-Donu, Taganrog: Southern Federal University Publ., 2019. 114 p. (in Russian).
- Chen W., Liu W., Pan N., Jiao W., Wang M. Oxytetracycline on functions and structure of soil microbial community // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2013. V. 13. No. 4. P. 967–975. doi: 10.4067/S0718-95162013005000076
- Liu B., Li Y., Zhang X., Wang J., Gao M. Combined effects of chlortetracycline and dissolved organic matter extracted from pig manure on the functional diversity of soil microbial community // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. V. 74. P. 148–155. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.03.005
- Molaei A., Lakzian A., Datta R., Haghnia G., Astaraei A., Rasouli-Sadaghiani M., Ceccherini M.T. Impact of chlortetracycline and sulfapyridine antibiotics on soil enzyme activities // *Int. Agrophys.* 2017. V. 31. P. 499–505. doi: 10.1515/intag-2016-0084
- Pinna M.V., Castaldi P., Deiana P., Pusino A., Garau G. Sorption behavior of sulfamethazine on unamended and manure-amended soils and short-term impact on soil microbial community // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. V. 84. P. 234–242. doi: 10.1016/j.ecoenv.2012.07.006
- Hammesfahr U., Bierl R., Thiele-Bruhn S. Combined effects of the antibiotic sulfadiazine and liquid manure on the soil microbial-community structure and functions // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2011. V. 174. No. 4. P. 614–623. doi: 10.1002/jpln.201000322
- Gutiérrez I.R., Watanabe N., Harter T., Glaser B., Radke M. Effect of sulfonamide antibiotics on microbial diversity and activity in a Californian Mollic Haploxeralf // *Journal of Soils and Sediments*. 2010. V. 10. P. 537–544. doi: 10.1007/s11368-009-0168-8
- Trifonova T.A., Chesnokova S.M., Kosmacheva A.G. Evaluation of the effect of ampicillin and tylosin antibiotics on the enzymatic activity of sod-podzolic soil and their toxicity to cultivated plants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 150–156 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-150-156
- Trifonova T., Kosmacheva A., Sprygin A., Chesnokova S., Byadovskaya O. Enzymatic activity and microbial diversity of sod-podzolic soil microbiota using 16S rRNA amplicon sequencing following antibiotic exposure // *Antibiotics*. 2021. V. 10. Article No. 970. doi: 10.3390/antibiotics10080970
- Zinchenko M.K. Enzymatic processes in the gray forest soils of the Upper Volga: monograph. Ivanovo: PreSsto Publ., 2019. 140 p. (in Russian).
- Kazeev K., Kolesnikov S., Valkov V. Biological diagnostic and indication of soils: the methodology and methods of researches. Rostov-na-Donu: RGU Publ., 2003. 216 p. (in Russian).
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2018. 216 p.
- USP Veterinary Pharmaceutical Information Monographs – Antibiotics. Blackwell Publishing // *J. Vet. Pharmacol. Ther.* 2003. V. 26. No. s2. 280 p. doi: 10.1034/j.1600-051x.26.s2.1.x
- Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and some scales for its evaluation // *Soviet Soil Science*. 1978. No. 6. P. 48–54 (in Russian).
- Yang Y., Herbold C.W., Jung M.-Y., Qin W., Cai M., Du H., Lin J.-G., Li X., Li M., Gu J.-D. Survival strategies of ammonia-oxidizing archaea (AOA) in a full-scale WWTP treating mixed landfill leachate containing copper ions and operating at low-intensity of aeration // *Water Research*. 2021. V. 191. Article No. 116798. doi: 10.1016/j.watres.2020.116798

The use of soil based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants in the greening of urban areas

© 2022. A. V. Ilinskiy¹ ORCID: 0000-0002-6843-9170, V. N. Selmen¹ ORCID: 0000-0002-4538-797X,
 E. V. Selmen¹ ORCID: 0000-0002-1949-4536, S. D. Karyakina² ORCID: 0000-0003-3225-8076,
 M. S. Matyukhin² ORCID: 0000-0003-2256-4520, V. V. Grebennikova² ORCID: 0000-0001-7701-3668,
¹All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation,
 44, bldg. 2, Bolshaya Akademicheskaya St., Moscow, Russia, 127550,
²LLC "ECO-ISYSKANIYA",
 202 office, letter L, 27, Firsova St., Ryazan, Russia, 390006,
 e-mail: ilinskiy-19@mail.ru, ecoiz62@mail.ru

In a field experiment, the effect of various doses of the agrochemical "Soil Green City", created on the basis of sewage sludge from sewage treatment plants of housing and communal services, on the growth and development of a flower and ornamental culture – *Salvia splendens*, when grown on flower beds in urban areas, was studied. The observations were carried out according to morphological parameters: the height of salvia plants, the number of inflorescences, flowers in the inflorescence. The positive influence of the agrochemical "Soil Green City" on the growth and development of the test flower and ornamental culture (*S. splendens*) has been established. The best results were obtained in the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 4 kg/m², the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 3 kg/m², is slightly inferior. When using the tested doses of the agrochemical "Soil Green City", the content of gross forms of heavy metals and arsenic in the soil did not exceed the values established by hygienic standards. In landscaping urban areas and creating favorable conditions for the growth and development of salvia when grown in flower beds and increasing its stress resistance to abiotic factors, it is recommended to use the agrochemical "Soil Green City" at a dose of 3–4 kg/m².

Keywords: agrochemical, sewage sludge, *Salvia splendens*, heavy metals, urbanized areas, flower and ornamental crops, environmental safety.

УДК 628.381.1:631.879.25: 631.879.42

Применение почвогрунта на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений в озеленении городских территорий

© 2022. А. В. Ильинский¹, к. с.-х. н., доцент, в. н. с.,
 В. Н. Сельмен¹, к. с.-х. н., с. н. с., Е. В. Сельмен¹, н. с.,
 С. Д. Карякина², к. с.-х. н., главный технолог,
 М. С. Матюхин², зам. директора,
 В. В. Гребенникова², руководитель обособленного подразделения,
¹Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
 и мелиорации имени А. Н. Костякова,
 127550, Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2,
²ООО «ЭКО-ИЗЫСКАНИЯ»,
 390006, Россия, г. Рязань, ул. Фирсова, д. 27, литера Л, офис 202,
 e-mail: ilinskiy-19@mail.ru, ecoiz62@mail.ru

В условиях полевого опыта изучено влияние различных доз внесения агрохимиката «Почвогрунт Зелёный город», созданного на основе осадков сточных вод канализационных очистных сооружений жилищно-коммунального хозяйства, на рост и развитие цветочно-декоративной культуры – сальвии (*Salvia splendens*) при выращивании на клумбах городских территорий. Наблюдения проводились по морфологическим показателям: высота растений сальвии, количество соцветий, цветков в соцветии. Установлено положительное влияние агрохимиката «Почвогрунт Зелёный город» на рост и развитие тестовой цветочно-декоративной культуры (*S. splendens*). Наилучшие результаты

получены в варианте с внесением агрохимиката в дозе 4 кг/м², немногим уступает вариант с внесением агрохимиката в дозе 3 кг/м². При использовании испытуемых доз агрохимиката «Почвогрунт Зелёный город» содержание в почве валовых форм тяжёлых металлов и мышьяка не превысило значений, установленных гигиеническими нормативами. В озеленении городских территорий и создании благоприятных условий для роста и развития сальвии при выращивании на клумбах и повышения её стрессоустойчивости к абиотическим факторам рекомендуется применение агрохимиката «Почвогрунт Зелёный город» в дозе 3–4 кг/м².

Ключевые слова: агрохимикат, осадки сточных вод, *Salvia splendens*, тяжёлые металлы, урбанизированные территории, цветочно-декоративные культуры, экологическая безопасность.

The development of industry and the growth of urbanization have led to the fact that in cities high levels of pollution of atmospheric air, surface and groundwater, as well as soil cover with pollutants can be recorded, which has a negative impact on the environment and negatively affects the quality of life of the urban population [1–3]. At the same time, landscaping of urban areas plays an important role in stabilizing the ecological situation, the possibility of which directly depends on the quality of soils; urban soils are strongly transformed and differ from natural soils in their structure and chemical composition [4–6]. The soil cover in most large cities experiences a powerful and long-term anthropogenic impact, leading to the development of degradation processes and, ultimately, to its depletion, thereby creating unfavorable conditions for the development of plants involved in urban greening [7–11].

Sewage sludge waste (SSW) from sewage treatment facilities of housing and communal services (HCS) can serve as a source of organic matter for the soil, as well as macro- and microelements such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, copper, zinc, etc., necessary for the normal course of physiological and biochemical processes in plants [12–16]. The introduction of additional organomineral components into the degraded soil of urban areas obtained from the waste of sewage treatment facilities of city HCS can be a promising method for ensuring the ecological comfort of urban areas during landscaping, planting trees, shrubs, flower beds, laying out lawns, grassing road slopes and landfills [17–19]. Regional features and the specifics of the work of specific sewage treatment plants have a significant impact on the concentration of pollutants in the SSW, bringing them closer to the limits of permissible concentrations [13, 14, 20]. Lead, nickel and arsenic are more actively concentrated in the wastewater treatment plants of the housing and communal services of the Ryazan region. The empirical series of pollutant accumulation in SSW, built on the basis of the results of estimating the concentration coefficients of elements, has the

following form: $Pb > Ni > As > Cu > Zn > Cr > Cd > Hg$ [13]. The use of such wastes as the basis for complex long-acting ameliorants also serves as a priority for their disposal [13, 19, 21]. In this regard, the use of organomineral ameliorants obtained on the basis of sewage sludge to improve the environmental sustainability of degraded and man-made urban lands, use in floriculture and landfill reclamation, has a high social, economic and environmental attractiveness in the implementation of nature restoration projects. This requires scientific substantiation and confirmation by the results of experimental studies [20, 22, 23].

The purpose of the research is to study the effect of various doses of the agrochemical “Soil Green City” obtained on the basis of SSW of sewage treatment facilities of the housing and communal services on the growth and development of a test flower-decorative crop (*Salvia splendens*), as well as assessing soil contamination with heavy metals and arsenic when using an agrochemical.

Objects and methods of research

The composition of the agrochemical includes a composted mixture of dehydrated sewage sludge with pine sawdust, with a moisture content of 70–80%. According to toxicological and agrochemical indicators, the agrochemical “Soil Green City” meets the standards for soils and their mixtures used for the improvement of populated areas (sanitary regulations SanPiN 1.2.3685-21, SanPiN 1.2.3684-21), fertilizers (State Standard GOST R 54651-2011) based on SSW group I, and is registered in the State Catalog of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use on the Territory of the Russian Federation in the section “Soils” (as of December 29, 2021).

The field experiment was laid in 2021 on the territory of the village of Solotcha in the city of Ryazan, Ryazan Region, located in the southern taiga subzone of soddy-podzolic soils. Scheme of laying and conducting a field experiment: option 1 (control) – without the use of agrochemicals

and fertilizers; option 2 – the agrochemical “Soil Green City” was introduced into the flower bed, at a dose of 2.0 kg/m²; option 3 – the agrochemical “Soil Green City” was introduced into the flower bed at a dose of 3.0 kg/m²; option 4 – the agrochemical “Soil Green City” was introduced into the flower bed at a dose of 4.0 kg/m². The field experiment included a randomized placement of variants in quadruple replication, the area of each plot was 9 m². The application doses are set taking into account the requirements of the standard (GOST 54651–2011): in green building it is allowed to apply organic fertilizers produced on the basis of sewage sludge, ensuring the introduction of the total nitrogen contained in them in the amount of 250–300 kg/ha. The content of nutrients in the agrochemical “Soil Green City” in terms of total nitrogen is 0.69% in dry matter, which corresponds to the application of 3.62–4.35 kg/m² of soil. The maximum recommended dose of 4 kg/m² of soil and two smaller doses, 2 and 3 kg/m² of soil in dry matter, were used for the field experiment.

The introduction of the agrochemical “Soil Green City” with a uniform distribution over the surface of the flower beds and subsequent mechanized incorporation (with motor-cultivator) into the soil to a depth of 20 cm was carried out on May 11, 2021. *Salvia splendens* (sparkling sage), which is actively used to create flower beds and lay lawns in the Ryazan region, was used as a test flower and decorative culture in the experiment. Seedlings of salvia flowers were planted on flowerbeds by municipal enterprise “ZhKU-22” on May 26, 2021, planting density was 54 pcs/m². Plant height measurements were carried out on the 8th, 22nd, 33rd, 51st, 85th and 100th days after planting seedlings in flower beds. On the 51st and 85th days, the number of inflorescences and the number of flowers in the salvia inflorescence were also measured. For each variant of the experiment, measurements were taken on 50 plants, then they were statistically processed using the Excel program.

At the end of the growing season, according to the variants of the field experiment, soil samples were taken from the 0–20 cm layer to determine the content of gross forms of heavy metals (HM) and arsenic. Soil sampling was carried out in accordance with GOST 17.4.3.01-17, GOST 17.4.4.02-17, GOST 28168-89. Analytical determinations of the content of gross forms of HM (copper, zinc, lead, cadmium, and mercury) and arsenic were performed according to standard methods [24–26] in a specialized accredited laboratory.

Meteorological observations performed at the stationary station of the Meshchersky branch of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation (VNIIGiM), located in the village of Solotcha, showed that the growing season of 2021 is characterized by an uneven distribution of precipitation: for the period May-September, 166.2 mm of precipitation fell, which is 98.8 mm less than the long-term average. This growing season was also characterized by uneven temperature distribution: the average daily air temperature for the growing season in 2021 was +19.1 °C, which is 3.6 °C higher than the long-term average. In general, the growing season of 2021 can be characterized as uncomfortable for plants with stress periods in terms of heat and moisture supply.

Results and discussion

In the field experiment, we studied the effect of various doses of the agrochemical “Soil Green City” on the dynamics of the height of salvia plants (Table 1).

Studies have shown that on the 8th day after planting salvia seedlings on flowerbeds, the largest increase in plant height was observed in option 2 (55.1% higher than in control); in option 4 the increase in plant height is 33.7% higher than in the control; in the third option the smallest value of the increase in plant height is noted (27.6%). On the 22nd day of the experiment, the largest increase in plant height was also

Table 1

The results of the study of the height dynamics of *Salvia splendens* plants in the field experiment, cm (significantly at $P \geq 0.95$)

Experiment options	Observation period					
	8th day	22nd day	33rd day	51st day	85th day	100th day
Control	6.06±0.03	11.98±0.02	16.80±0.04	22.04±0.05	22.92±0.04	23.19±0.04
Option 2	9.40±0.04	15.17±0.03	19.30±0.04	22.20±0.04	25.62±0.05	26.20±0.04
Option 3	7.73±0.04	13.91±0.03	22.20±0.05	27.26±0.06	31.34±0.06	32.38±0.06
Option 4	8.10±0.05	13.97±0.03	22.24±0.04	27.60±0.06	32.07±0.05	33.37±0.06

observed in option 2 (26.6% higher than in the control); then option 4 follows with an increase in plant height of 16.6%; in the third option the smallest value of the increase in plant height is noted (16.1%). On the 33rd day, the largest increase in plant height was observed in option 4 (32.4%); then option 3 follows with an increase in plant height (32.1%); the smallest value of the increase in plant height is noted in the second option (14.9%). On the 51st day, the largest increase for salvia was observed in option 4 (25.2%); slightly less – in option 3 (23.7%); the smallest growth value was recorded in the second option (0.7%). On the 85th day, the largest increase in plant height was also noted in the fourth option (39.9%), followed by option 3, in which the increase was 36.7%, the smallest increase was recorded in option 2 (11.8% higher than in control). On the 100th day of the experiment, the largest increase in plant height was recorded in option 4 (43.9%), the average increase was obtained in option 3 (39.6%), the smallest increase was observed in option 2 (13.0% higher than in control).

The results of counting salvia inflorescences and the number of flowers in one inflorescence using the agrochemical “Soil Green City” are shown in Figures 1 and 2.

On the 51st day of the experiment, the largest number of inflorescences on the salvia shrub was observed in option 4 (206% higher than in control), followed by option 3 (138% higher than

in control), in the second option and the control option the number of inflorescences is the same and amounted to 1.8 pcs. On the 85th day of the experiment, the largest number of inflorescences on the salvia shrub was also observed in option 4 (175% higher than in control), followed by option 3 (137% higher than in control), the lowest value was recorded in option 2 – 4.4 pieces, which is 10% higher than in the control option.

On the 51st day of the experiment, the largest number of flowers in the salvia inflorescence is observed in option 4 (55% higher than in the control), followed by variant 3 with an increase of 49%, the lowest value was recorded in option 2 (20% higher than in the control option). On the 85th day of the experiment, despite unfavorable meteorological conditions for the flowering of salvia in the period from the 51st to the 85th days of the experiment (July to August of the growing season 2021), which led to the fact that the flowers in the salvia inflorescences partially wilted and fell off, a similar trend is observed: the largest number of flowers in the inflorescence was recorded in option 4 – 77.0 pcs., which is 55% higher than in the control, slightly less in option 3 – 71.2 pcs., which is 44% higher than in the control, the lowest value obtained in option 2 – 64.6 pcs., which is 30% higher than in the control.

When using the agrochemical “Soil-Green City” in doses of 2–4 kg/m², the content of gross forms of heavy metals (Pb, Ni, Cu, Zn,

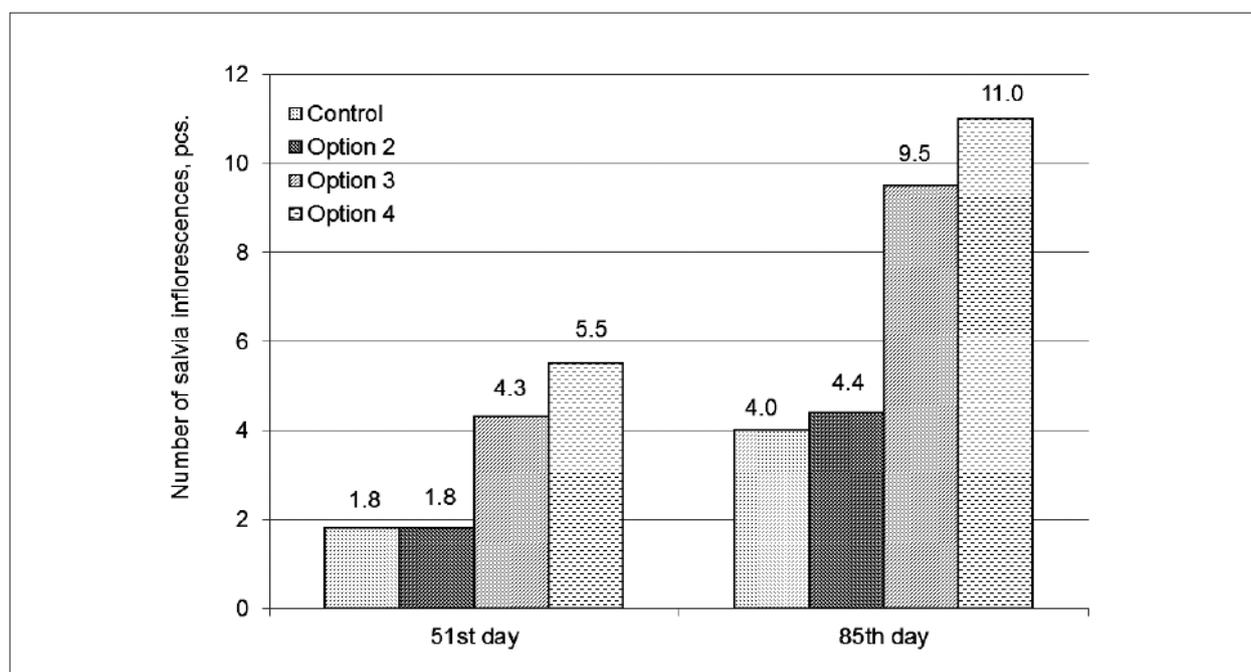


Fig. 1. Comparative assessment of the number of salvia inflorescences when using the agrochemical “Soil Green City” on flowerbeds

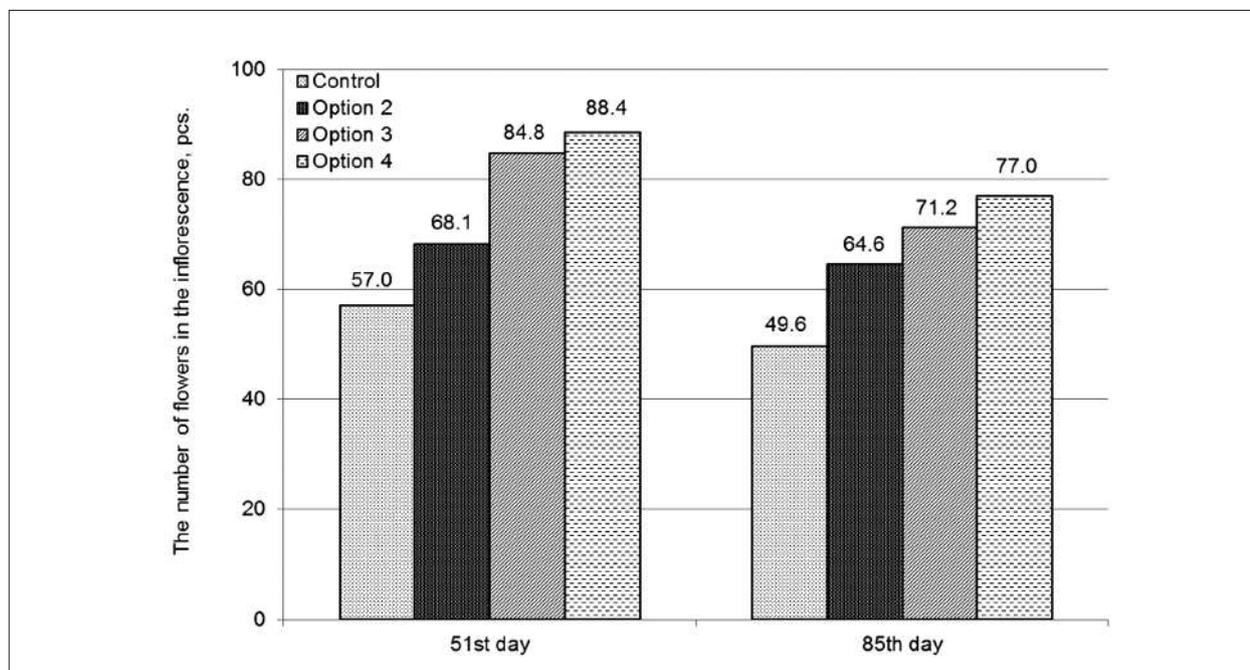


Fig. 2. Comparative assessment of the number of flowers in the inflorescence of salvia when using the agrochemical “Soil Green City” in flowerbeds

Table 2

The content of gross forms of heavy metals and arsenic in the soil when using the agrochemical “Soil Green City”, mg/kg

No.	Element	Agrochemical application dose, kg/m ²			Standard content
		2	3	4	
1	Lead	12.7±3.8	13±4	14±4	32*
2	Nickel	6.2±1.9	6.4±2.0	7.0±2.3	20*
3	Arsenic	1.53±0.07	1.63±0.06	1.72±0.08	2.0*
4	Copper	8.2±2.5	9.5±2.8	10.6±3.2	33*
5	Zinc	33±10	43±6	47±5	55*
6	Chromium	5.1±2.1	6.2±2.3	8±5	61**
7	Cadmium	0.26±0.08	0.30±0.09	0.33±0.11	0.5*
8	Mercury	0.033±0.021	0.061±0.028	0.09±0.05	2.1*

Note: * – according to SanPiN 1.2.3685-21, ** – background for soils of the Moscow region [27].

Cr, Cd, Hg) and As in the soil did not exceed the values established by sanitary and hygienic standards.

Conclusion

The positive effect of the test doses of the agrochemical “Soil Green City” on the growth and development of salvia (*S. splendens*) was experimentally confirmed. This flower-decorative culture showed the best results in the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 4 kg/m², slightly inferior to the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 3 kg/m². On the 8th and 22nd day of the experiment, the best results in terms of the

height of salvia plants were obtained in the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 2 kg/m². However, starting from the 33rd day of the experiment and until its completion, the best results in terms of plant height were obtained in the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 4 kg/m²; the variant with the introduction of an agrochemical at a dose of 3 kg/m² is slightly inferior to it. This circumstance apparently is associated with the prolonged release of nutrients from the agrochemical into the soil solution and their entry into the plants. When the agrochemical “Soil Green City” was applied in doses of 2–4 kg/m², the content of gross forms of heavy metals in the soil did not exceed the values established

by sanitary and hygienic standards. To create favorable conditions for the growth and development of salvia when grown in flowerbeds and increase its stress resistance to abiotic factors, it is recommended to use the agrochemical “Soil Green City” at a dose of 3–4 kg/m². In the future, it seems appropriate to continue this field experiment to assess the prolonged impact of the agrochemical “Soil Green City” on flower and ornamental crops and the dynamics of the content of heavy metals in the soil.

References

1. Kochurov B.I., Lobkovsky V.A., Ivashkina I.V., Gruntovich T.A. Agroecopolises – new structures of ecologically balanced and safe development of agrolandscapes // *Ecology of Urbanized Territories*. 2018. No. 1. P. 77–83 (in Russian).
2. Olkova A.S., Makhanova E.V. Comparative analysis of the ecological state of soils near landfills for waste storage for different periods of operation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 35–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-035-042
3. Kireycheva L.V., Yashin V.M., Ilyinsky A.V. Sanation and restoration of fertility of technogenically polluted soils // *Agrochemical Bulletin*. 2008. No. 5. P. 8–10 (in Russian).
4. Lebedeva G.S., Kormilitsyna O.V., Latanov A.A., Bondarenko V.V. Influence of physical degradation of urban soils on the state of green spaces // *Forest Bulletin*. 2016. No. 1. P. 90–93 (in Russian).
5. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Balabina I.P., Kochurov B.I., Kulikova E.V. Resource approach to the assessment of soil pollution by heavy metals and the study of the capacity of geochemical barriers on the example of the city of Kursk // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 28–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-028-034
6. Fazekas J., Štofejová L., Baláž I., Tulis F., Fazekasová D., Petrovi F., Tóth T. Soil contamination in the problem areas of agrarian Slovakia // *Land*. 2021. No. 10 (11) [Internet resource] <https://doi.org/10.3390/land10111248> (Accessed: 15.12.2021).
7. Skugoreva S.G., Kut'yavina T.I., Ogorodnikova S.Yu., Kondakova L.V., Simakova V.S., Blinova A.L., Zykova Yu.N., Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya. An integrated approach to assessing the ecological condition of urban soils // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 57–65 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-057-065
8. Voronich S.S., Roeva N.N., Grebenkin N.N., Zaitsev D.A., Khlopaev A.G., Yankovsky S.A. Evaluation of the impact of exhaust gases on the ecological condition of the soil cover of urbanized territories // *Ecology of Urbanized Territories*. 2019. No. 1. P. 122–126 (in Russian). doi: 10.24411/1816-1863-2019-11122
9. Novikov S.G., Medvedeva M.V., Bakhmet O.N. Evaluation of the ecological condition of soils in the natural recreational zone of Petrozavodsk // *Ecology of Urbanized Territories*. 2019. No. 4. P. 6–11 (in Russian). doi: 10.24411/1816-1863-2019-14006
10. Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Kotik M.V. Degradation of the physical properties of soils of the chernozem zone in the conditions of the city // *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. V. 18. No. 2. P. 226–229 (in Russian).
11. Mojeed A.A., Abiodun O.A., Martins A.A., Omobola O.O. Heavy metals in wastewater and sewage sludge from selected municipal treatment plants in Eastern Cape province, South Africa // *Water*. 2020. V. 12. No. 10. Article No. 2746 [Internet resource] <https://doi.org/10.3390/w12102746> (Accessed: 14.12.2021).
12. Kasatikov V.A. The use of urban sewage sludge // *Agrochemical Bulletin*. 2013. No. 4. P. 44–46 (in Russian).
13. Ilyinsky A.V., Evsenkin K.N., Nefedov A.V. Substantiation of the environmentally safe use of wastewater sludge from sewage treatment facilities of housing and communal services // *Agrochemical Bulletin*. 2020. No. 3. P. 60–64 (in Russian). doi: 10.24411/0235-2516-2020-10009
14. Tampio E., Salob T., Rintala J. Agronomic characteristics of five different urban waste digestates // *Journal of Environmental Management*. 2016. V. 169. P. 293–302.
15. Malakhova S.D., Tyutyunkova M.V., Fedorova Z.S., Chudinova M.V. Changes in the main fertility parameters of soddy-podzolic sandy loamy soil under increasing doses of sewage sludge // *Ecology of Urbanized Territories*. 2016. No. 1. P. 6–10 (in Russian).
16. Dogadina M.A. Ecological assessment of the influence of non-traditional fertilizers on the properties of dark gray forest soils // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 69–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-069-076
17. Golubeva E.I., Korol T.O. Landscape and environmental planning of urban areas: practical aspects // *Problems of Regional Ecology*. 2015. No. 1. P. 152–159 (in Russian).
18. Vaisman Ya.I., Kalinina E.V., Rudakova L.V. Using the material potential of hazardous industrial waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 27–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-027-034
19. Galchenko S.V., Cherdakova A.S. Substantiation of the use of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants as a fertilizer // *Ecological Bulletin of Russia*. 2012. No. 3. P. 30–34 (in Russian).
20. Burdin I.A., Guseva T.M., Ilyinsky A.V., Kireycheva L.V. Improving the technology for obtaining effluent from organic waste // *Life Safety*. 2021. No. 5. P. 40–46 (in Russian).
21. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V., Sazanova M.L., Kozvonin V.A., Petukhov D.V. for conversion of whey into organic-mineral fertilizers with amino acids // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 87–93 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-087-093

22. Kireycheva L.V., Ilyinsky A.V. Sanitation of arsenic-contaminated soils using a combined ameliorant // Bulletin of the Russian Agricultural Science. 2015. No. 4. P. 37–39 (in Russian).

23. Ilyinsky A.V., Matveev A.V., Evsenkin K.N. Creation of a database “Methods for increasing the productivity of soils of reclaimed agricultural lands” // Selskiy Mekhanizator. 2021. No. 8. P. 35–36 (in Russian). doi: 10.47336/0131-7393-2021-8-35-36

24. Method for performing measurements of the mass fraction of elements in samples of soils, soils and bottom sediments using the methods of atomic emission and atomic absorption spectrometry (M-MVI-80-2008). Sankt-Peterburg, 2008. 36 p. (in Russian).

25. ERD F 16.1:2.2:2.3:3.36-2002. Quantitative chemical analysis of soils. Method for measuring the total content of cadmium, cobalt, manganese, copper, nickel, lead, chromium and zinc in soils, bottom sediments, sewage sludge and waste using flame atomic absorption spectrometry. Moskva, 2002. 22 p. (in Russian).

26. Guidelines for the determination of arsenic in soils by the photometric method. Moskva: Central Research Institute of Agrochemical Services for Agriculture, 1993. 13 p. (in Russian).

27. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sargsyan S.Sh. Geochemistry of the environment. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).

Проект «Натуральные удобрения пролонгированного действия, полученные на основе «зелёной химии»

Разработка и внедрение зелёных технологий является важнейшим трендом развития мировой экономики на современном этапе. Инновационные разработки и перспективные технологические решения, позволяющие снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду и обеспечить рациональное использование природных ресурсов, представляют большой интерес для современного бизнеса как в России, так и за рубежом. К числу соответствующих разработок можно отнести проект «Натуральные удобрения пролонгированного действия, полученные на основе «зелёной химии» из Вятско-Камских фосфоритов и вятского торфа», разработанный учёными научно-исследовательской лаборатории биомониторинга Вятского государственного университета (научный руководитель – к.х.н., доцент Н.В. Сырчина). Соответствующий проект прошёл экспертный отбор в конкурсе стратегических инициатив и вошёл в топ 1000 инициатив для форума «Сильные идеи для нового времени – 2022».

Желваковые фосфориты и торф являются важнейшими полезными ископаемыми Кировской области. На основе соответствующих природных ресурсов может быть налажено производство широкой линейки органоминеральных удобрений (ОМУ) с улучшенными характеристиками, натуральных удобрений для органического земледелия и почвенных мелиорантов. К преимуществам вятских фосфоритов следует отнести низкое содержание токсичных элементов, в частности кадмия, хорошую биодоступность фосфора, наличие в составе руды глауконита, оказывающего положительное влияние на активность почвенных азотфиксирующих микроорганизмов, химический состав и структуру почвы.

В отличие от традиционных растворимых минеральных удобрений, ОМУ на основе фосфоритов Вятско-Камского месторождения характеризуются пролонгированным периодом действия, не вымываются из почвы, способствуют оптимизации pH и детоксикации корнеобитаемого горизонта за счёт сорбции ряда тяжёлых металлов глауконитом. Производство ОМУ ориентировано на безотходную переработку добываемой руды, низкую энергоёмкость производственного процесса и исключение химического воздействия на сырьевые компоненты, что полностью соответствует принципам «зелёной химии».

Организаторами конкурса является Агентство стратегических инициатив. Первый, подготовительный, этап конкурса пройдёт с 1 июня по 4 июля, второй этап – с 5 июля по 20 июля 2022 г. Желаю участникам проекта успешного прохождения всех этапов конкурса и внедрения проекта в практику!

*Зав. лабораторией биомониторинга ВятГУ,
д.т.н., профессор Т.Я. Ашихмина*

Tree diversity and carbon stock in North Poblacion and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines)

© 2022. J. M. Bambalan^{ORCID: 0000-0003-0657-9482}, I. K. S. Palapal^{ORCID: 0000-0001-5315-2137},
R. V. Guleng^{ORCID: 0000-0002-7359-479X}, E. E. Coracero^{ORCID: 0000-0002-2569-3179},
R. B. J. Gallego^{ORCID: 0000-0003-0626-1562}, M. J. A. Suniega^{ORCID: 0000-0001-8932-8720}
Aurora State College of Technology,
Barangay Zabali, Baler, Aurora, Philippines, 3200,
e-mail: jaybambalan15@gmail.com

Trees are very important components of an ecosystem which act as key elements of biodiversity which also provides countless benefits and protection from adverse events such as climate change. This study focused on the assessment of diversity and carbon storage potentials of tree species in Barangay North Poblacion and Barangay South Poblacion in Dipaculao, Aurora. The study covered a 100% inventory of the trees with diameter at breast height of at least 5 cm. The area was found to have a high overall diversity ($H' = 3.278$; $1-D = 0.963$) with 68 morpho-species of trees, 1290 individuals and 23 families. The most abundant species were *Swietenia macrophylla* King, *Mangifera indica* L., and *Gmelina arborea* Roxb. Ex Sm. collectively with 465 individuals. Ecological status assessment revealed 32 indigenous, four threatened (IUCN [18]), six threatened (DAO 2017-11 [19]), and three invasive species. Notable among the species were the three Philippine endemics – *Artocarpus blancoi* (Elmer) Merr., *Ficus pseudopalma* Blanco, and *Drypetes falcata* (Merr.) Pax & K. Hoffm. The overall tree biomass estimates were 2367.60 tons using Brown formula while 2328.90 tons using the equation of Chave. For carbon storage potential, the overall estimated values of two barangays were 1183.8 tons (16.28 t/ha) using Brown and 1164.45 tons (16.01 t/ha) using Chave. *Samanea saman* (Jacq.) Merr. had the highest carbon storage potential of 407.4 tons using Brown and 342.2 tons using Chave. The results of the study can serve as a guide to the local government in the planning the conservation and protection measures for the tree species in the area.

Keywords: developed areas, Philippine trees, tree carbon stock, tree diversity, urban trees.

УДК 630+574.36

Разнообразие древесной растительности и запасы углерода в Северном и Южном Побласьоне (Дипакулао, Аврора, Филиппины)

© 2022. Дж. М. Бамбалан, студент,
И. К. С. Палпал, студент,
Р. В. Гуленг, студент,
Э. Э. Корачеро, инструктор,
А. Б. Дж. Гальего, PhD, доцент,
М. Дж. А. Саньего, инструктор,
Государственный технологический колледж Аврора,
3200, Филиппины, Аврора, Балер, Барангай Забали,
e-mail: jaybambalan15@gmail.com

Деревья являются очень важными компонентами экосистемы, выступающими в качестве ключевых элементов биоразнообразия, а также обеспечивающими защиту от неблагоприятных явлений, таких как изменение климата. Цель данного исследования заключалась в оценке разнообразия древесных пород и их способности накапливать углерод в округах Северный и Южный Побласьон в Дипакулао, Аврора (Филиппины). В ходе исследования на территории округов проведена 100% инвентаризация деревьев с диаметром на высоте груди не менее 5 см. Было обнаружено, что территория отличается высоким общим разнообразием ($H' = 3,278$; $1-D = 0,963$), оно представлено 68 морфовидами деревьев, 1290 особями и 23 семействами. Наиболее многочисленными видами были *Swietenia macrophylla* King, *Mangifera indica* L. и *Gmelina arborea* Roxb. Ex Sm., в совокупности они составили 465 особей. Оценка экологического состояния выявила 37 коренных видов, 10 видов, находящихся под угрозой исчезновения (4 вида из списка IUCN [18], 6 видов из DAO 2017-11 [19]), и 3 инвазивных вида. Среди видов деревьев выделя-

лись три филиппинских эндемика – *Artocarpus blancoi* (Elmer) Merr., *Ficus pseudopalma* Blanco и *Drypetes falcata* (Merr.) Pax & K. Hoffm. Общая биомасса деревьев составила 2367,6 т по формуле Брауна и 2328,9 т по формуле Чапе. Что касается потенциала накопления углерода, общие оценочные значения для Северного и Южного Пoblacion составили 1183,8 т (16,28 т/га) с использованием формулы Брауна и 1164,45 т (16,01 т/га) с использованием формулы Чапе. Вид *Samanea saman* (Jacq.) Merr. имел самый высокий потенциал накопления углерода: 407,4 т при использовании формулы Брауна и 342,2 т при использовании формулы Чапе. Результаты исследования могут быть использованы органами местного самоуправления при планировании мероприятий по сохранению и защите древесных пород в районе исследования.

Ключевые слова: развитые районы, деревья Филиппин, запас углерода в деревьях, разнообразие деревьев, городские деревья.

Trees are one of the most important components of the ecosystem. They provide several benefits to the environment, animals, and even to humans. Trees sustain a livable environment by producing oxygen through photosynthesis and releasing it for consumption of animals and humans [1]. Trees also serve as key elements of biodiversity as it provides habitat and food for wildlife species [2]. Humans also obtain countless benefits from trees. Trees provide and maintain a safe environment by giving protection from natural calamities such as typhoons, landslides, floods, and even from the impact of climate change by storing carbon in its biomass [3]. A life sustaining environment is made possible by trees through enhancing the food production livelihood of the people [4].

Unfortunately, trees and forest cover are generally decreasing in the global scale. Since 1990, an estimated amount of 420 million hectares of forest have been lost due to agricultural expansion, forest degradation, and land conversion [5]. Also, development of areas which eventually leads to its rapid urbanization greatly contributes to the loss of remaining trees [6]. Forested areas across the world are continuously converted into commercial areas being driven by urbanization [7]. Due to these scenarios, the supposedly numerous benefits that trees can provide also decrease with its number. Inclusion of trees in urbanized and developed areas are being done, however, inappropriate locations, choice of species, lack of sufficient monitoring and maintenance can be observed [8]. Thus, it is important to regularly assess and monitor the trees present in an area with respect to its diversity and ecosystem services (i.e., carbon storage potential) they provide.

Tree diversity and carbon stock assessments are effective tools in uncovering useful information concerning the underlying problems relating to their overall diversity, ecological status, and carbon storage potentials [9, 10]. Product of these assessments can also be used in development of strategies and plans to combat loss of trees especially in developed areas where land use planning is vital [11].

The two barangays, namely North Poblacion and South Poblacion are the central and most developed part of Dipaculao, Aurora. It is where the public markets, municipal halls, convenience stores, schools, residence and other infrastructures are located making it the densest portion of the municipality. The establishment of these commercial and residential spaces affected the forest in the area leaving only the trees in the street sides, house yards, and compounds of schools and municipal hall. To prevent trees of being completely lost in the barangays, their diversity and carbon storage potentials shall be assessed. The product of this study will greatly help development of plans and ordinances that can protect the trees in the area.

The issues concerning loss of biodiversity especially the trees and the intensifying impact of climate change had driven the researchers to pursue the description and quantification of tree diversity and carbon stock. This study was conducted to assess the tree diversity and carbon storage potentials in North and South Poblacion, Dipaculao, Aurora with reference to the developed areas within the study area. The research was also directed to explore the species composition and diversity, ecological status of tree species, as well as the biomass and carbon storage potentials of the trees in the area.

Methodology

Study Site. The study was conducted in two barangays, North Poblacion and South Poblacion in Dipaculao, Aurora. Dipaculao is a municipality with a total land area of 361.64 square kilometers equivalent to about 11.54% of Aurora's total area. North Poblacion and South Poblacion have a land area of 72.72 hectares (Fig. 1, see color insert V).

Data Collection. The researchers conducted a 100% inventory of trees with diameter at breast height (DBH) of at least 5 cm. Numerous publications in the tropical countries in Asia and the Philippines also followed the 5-cm cut-off for their surveys [12–14], thus, the researcher

**J. M. Bambalan, I. K. S. Palapal, R. V. Guleng,
E. E. Coracero, R. B. J. Gallego, M. J. A. Suniega
"Tree diversity and carbon stock in North Poblacion
and South Poblacion (Dipaculao, Aurora, Philippines)". P. 198**

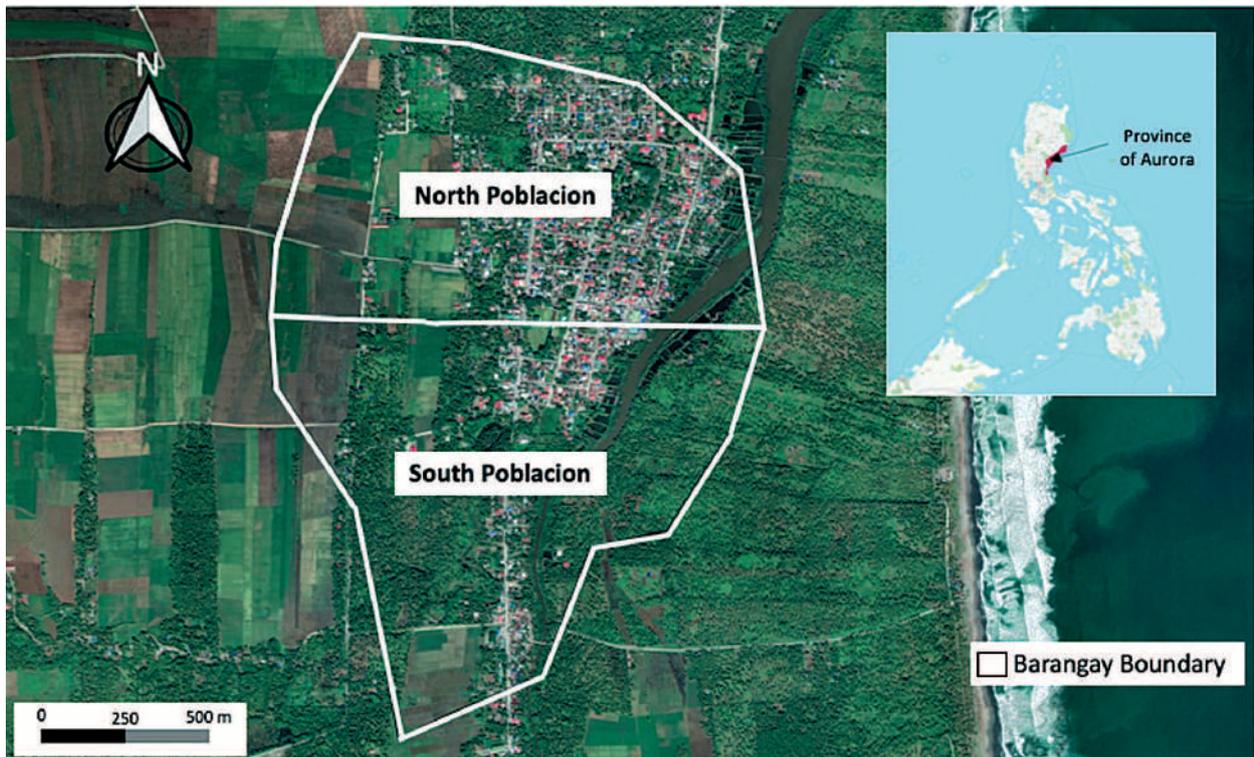


Fig. 1. Location map of the study site

Table 1

Fernando biodiversity scale [15]		
Relative Values	Shannon Index	Evenness Index
Very high	3.5 and above	0.75–1.00
High	3.0–3.49	0.5–0.74
Moderate	2.5–2.99	0.25–0.49
Low	2.0–2.49	0.15–24
Very low	1.9 and below	0.05–0.14

followed the same. The parameters measured during the data gathering were DBH (obtained at 1.3 m from the ground), merchantable height, total height and remarks on its location. Species identification was done in the field based on morphological characteristics of the trees.

Diversity Indices Computation. This study computed the diversity of trees (Shannon and Simpson) using Paleontological Statistical Software Package for Education and Data Analysis (PAST 4.18). Shannon Index measures diversity using species richness and distribution. Simpson Evenness measures diversity in terms of evenness in the distribution of individuals species. Diversity values were interpreted using the scheme of Fernando Biodiversity Scale [15] (Table 1).

Ecological Status Assessment. Endemism, indigeneity, invasiveness, and conservation status of each species were assessed and verified through different sources and databases. Data on endemism and indigeneity were obtained on the comprehensive database of plants in the Philippines, the Co’s Digital Flora of the Philippines [16]. Species invasiveness was assessed using the paper on Invasive alien species (IAS): concerns and status in the Philippines [17]. For the conservation status, worldwide category was based on the International Union for Conservation of Nature Red list [18]. For the Philippine scheme, the local list of threatened species under DAO 2017-11 was used [19].

Carbon Stock Computation. Two allometric equations were used in estimating the aboveground biomass of trees, the Brown [20] and Chave et al. [21] which were found suitable due to the climatic zone of the area being tropical moist. The formula of Brown used diameter in cm as input.

$$Y = \exp(-2.134 + 2.530 \cdot \ln(D)) \quad (1),$$

where Y – Tree aboveground biomass (in kilograms), D – Diameter at breast height (in centimeters).

The formula of [21] incorporated the specific wood density. The specific wood density values

for this study was obtained from the World Agroforestry wood database.

$$Y = p \cdot \exp(-1.499 + 2.148 \cdot \ln(D) + 0.0207 \cdot (\ln(D))^2 - 0.0281 \cdot (\ln(D))^3) \quad (2),$$

where p – Specific wood density.

The belowground biomass (BGB) was also estimated as 15% of the aboveground biomass (AGB or Y) expressed as $BGB = AGB \cdot 15\%$. Lastly, the carbon storage (CS) was estimated as the 50% of the total tree biomass expressed as $CS = (AGB + BGB) \cdot 50\%$.

Results and Discussion

Tree Composition and Diversity

There were 68 morpho-species of trees and 1290 individuals belonging to 23 families recorded in North Poblacion and South Poblacion. Among these families, Fabaceae, Moraceae, and Annonaceae were the most specious with 12, 9, and 5 species, respectively. In terms of number of individuals, Meliaceae, Fabaceae, and Anacardiaceae were the most abundant with 258, 205, and 180 individuals, respectively. Species-wise, *Swietenia macrophylla* King or Big Leaf Mahogany was the most dominant with 191 individuals (14.8% of the total number of individuals), followed by *Mangifera indica* L. with 172 (13.33%) and *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. with 102 (7.91%). These three most abundant species alone had a total of 465 individuals which is equivalent to 36.05% of the total individual trees recorded. The overwhelming individual counts of these species are somehow anticipated. Two of these species, *S. macrophylla* and *G. arborea* were recorded as invasive alien species to the Philippines with aggressive capacity to adversely affect the native species existing in the area [17]. A number of diversity studies in public green spaces and human settlements also found *S. macrophylla* and/or *G. arborea* either as most abundant species or dominant species [22, 23].

In terms of diversity, the two barangays collectively were highly diverse in Shannon Index (H') value of 3.278 and very highly diverse for Simpson Evenness (1-D) with 0.963 (Fig. 2). Individually, South Poblacion had a higher tree diversity than North Poblacion. There were 48 tree species and 390 individuals in South Poblacion with H' of 3.224 and 1-D of 0.935. On the other hand, North Poblacion had 60 species and 900 individuals with H' of 3.181 and 1-D of 0.933. However, both areas fell under the category of high tree diversity.

The diversity of trees in specific areas at each barangay was also assessed. Diversity values ranged from 1.714 (very low) to 3.349 (high) for Shannon while 0.475 to 0.903 for Simpson Evenness (Fig. 3). Trees in the roadside and residential area had the highest diversity in terms of Shannon index ($H' = 3.349$) mainly contributed by its high number of species (60) and individuals (578) but was lowest in terms of Simpson Evenness (0.0475) due to the uneven distribution where Mahogany and Mango dominated the area with 134 and 123 individuals, respectively. It was equivalent to 44.46% of all trees in the road/residential. Moreover, the number of individuals per species in the road/residential ranged from 1 to 90. On the other hand, the church area had the highest Simpson Evenness diversity of 0.903. It was brought by the even distribution of 56 tree individuals among 17 species in the area where no one or two species dominated the area. The number of individuals per species in the church area only ranged from 1 to 9.

In South Poblacion, there were only two main areas namely, roadside/residential and the Dipaculao Central Elementary School (DCES). The diversity was higher at the roadside/residential area ($H' = 3.184$; 1-D = 0.933) which fell in highly diverse category than in DCES ($H' = 2.499$; 1-D = 0.863) that fell under the moderately diverse category for Shannon while very highly diverse for Simpson Evenness (Fig. 4). An overwhelming dominance of one or two species was not observed in these two areas of South Dipaculao which possibly prevented the diversity to fall under the low to very low category of diversity. The 390 individuals of trees in the barangay were distributed in a relatively even manner among 48 species. Individuals per species only ranged from 1 to 57.

The areas are considered as the premiere portions of Dipaculao in terms of infrastructure and development. Thus, results of this study must be compared in researches conducted in the same settings, developed or urban areas. As

of today, there were very limited studies in the Philippines on tree diversity in developed areas with human settlements and presence of commercial spaces. Some of these are the studies of Coracero et al. in Laguna State Polytechnic University (LSPU) at San Pablo City, Laguna with H' of 1.705 and 1-D of 0.367 which fell to the very low diversity category [24]. Another study was conducted in Bicol Kalikasan Park at Legazpi City, Albay where H' was 2.84 and 1-D was 0.92 [22]. A tree study in six public green spaces in Bacolod and Iloilo revealed Shannon index values ranging from 0.43 to 0.91 which were considered to be of very low diversity. Generally, the overall diversity in North Dipaculao and South Dipaculao as well as the diversity across specific areas within the barangays were relatively higher than the studies mentioned. One reason is that, Dipaculao has not reached the level of urbanization and development in the compared areas. However, the same fate with these urbanized areas may also happen to Dipaculao if the trees will not be part of the planning and priority of the government.

Ecological Status of Trees in North Poblacion and South Poblacion

Philippine Native and Endemic Tree Species. Thirty-two out of 68 tree species (47.1%) were found to be native to the country (Table 2). Among these, four were endemic or restricted only to the Philippines. These endemic species were *Artocarpus blancoi* (Elmer) Merr., *Ficus pseudopalma* Blanco, and *Drypetes falcata* (Merr.) Pax & K. Hoffm.

Threatened Species. Forty-four (44) species were listed in either the IUCN Redlist and/or DAO 2017-11 (Table 3). Among these, 42 species were found in the IUCN Redlist of which four has threatened status (two Vulnerable, two Endangered) while the remaining 38 has records of assessment (1 Data deficient, 36 Least concern, and a Near threatened). On the other hand, six species were threatened as per the list of DAO 2017-11 (two Other Threatened Species, and four Vulnerable). Notable among these species were the two forms of Narra, namely *Pterocarpus indicus* Willd. forma *echinatus* (Pers.) Rojo (Prickly Narra) and *Pterocarpus indicus* Willd. forma *indicus* (Smooth Narra).

Invasive Species. There were three invasive species found in the area (Table 4). These species had a total of 302 individuals equivalent to 23.41% of all individuals of trees in the two barangays.

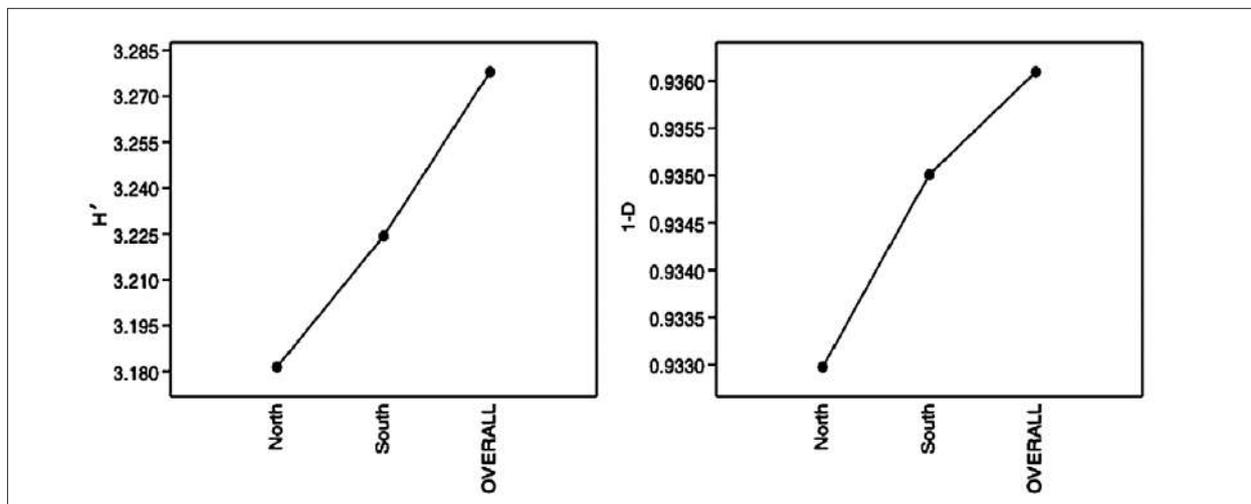


Fig. 2. Computed Shannon diversity (left) and Simpson Evenness (right) of trees in North Poblacion and South Poblacion

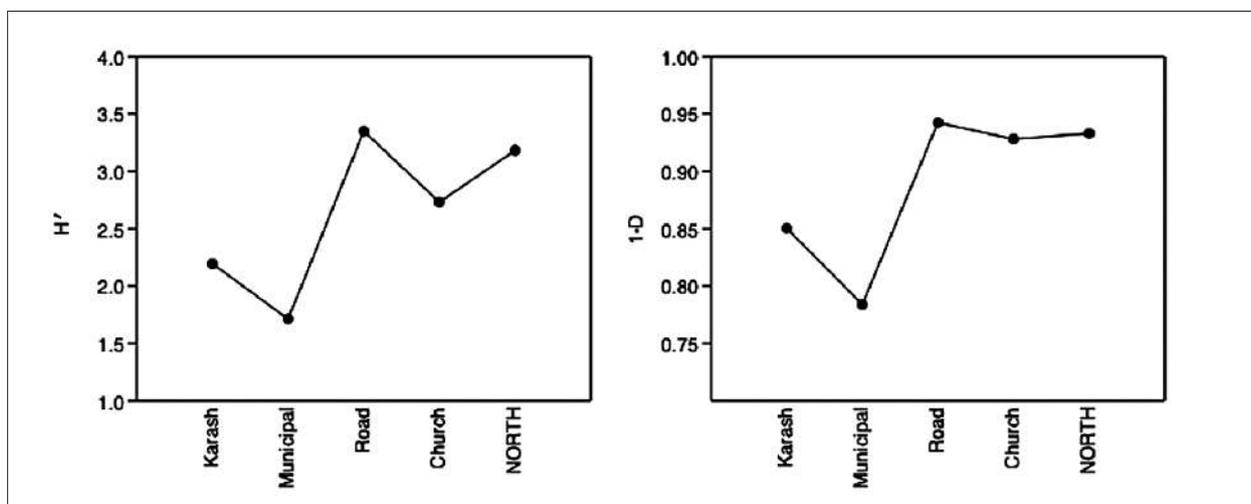


Fig. 3. Computed Shannon diversity (left) and Simpson Evenness (right) of trees in North Poblacion: Karash, Road/Residential, Municipal Hall, Church

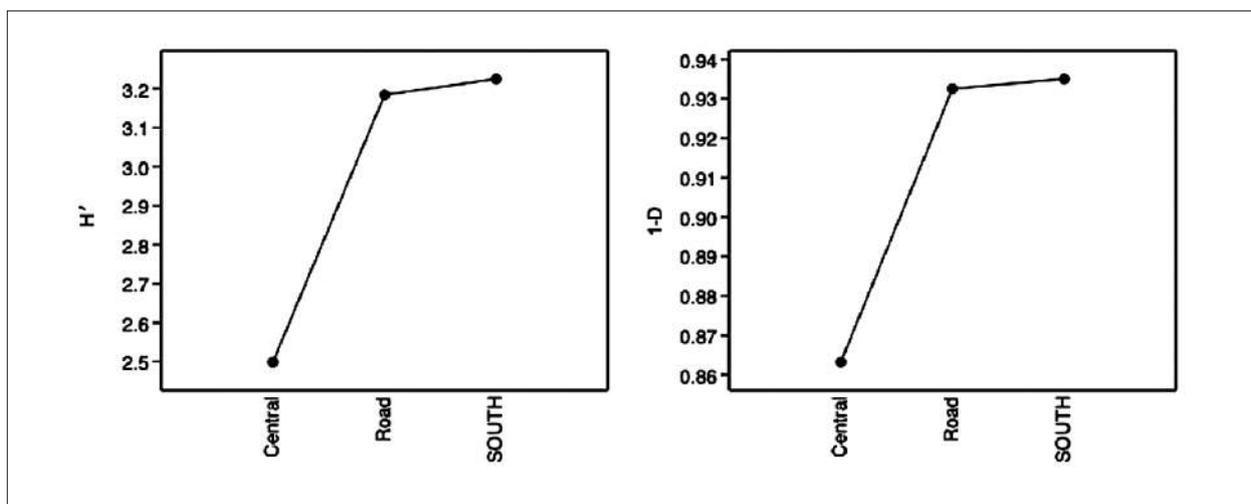


Fig. 4. Computed Shannon diversity (left) and Simpson Evenness (right) of trees in South Poblacion: Central School and Road/Residential

Table 2

Taxonomic list of Philippine native species in the area with notes on their endemism

No.	Family	Scientific Name
1	Anacardiaceae	<i>Koordersiodendron pinnatum</i> (Blanco) Merr.
2	Anacardiaceae	<i>Spondias pinnata</i> (L.f.) Kurz
3	Apocynaceae	<i>Alstonia scholaris</i> (L.) R.Br.
4	Apocynaceae	<i>Tabernaemontana pandacaqui</i> Poir.
5	Bignoniaceae	<i>Radermachera pinnata</i> Seem.
6	Euphorbiaceae	<i>Macaranga grandifolia</i> (Blanco) Merr.
7	Euphorbiaceae	<i>Macaranga tanarius</i> (L.) Müll.Arg.
8	Euphorbiaceae	<i>Melanolepis multiglandulosa</i> (Reinw. ex Blume) Rechb. & Zoll.
9	Fabaceae	<i>Bauhinia purpurea</i> L.
10	Fabaceae	<i>Erythrina variegata</i> L.
11	Fabaceae	<i>Intsia bijuga</i> (Colebr.) Kuntze
12	Fabaceae	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre
13	Fabaceae	<i>Pterocarpus indicus</i> Willd. forma <i>echinatus</i> (Pers.) Rojo
14	Fabaceae	<i>Pterocarpus indicus</i> Willd. forma <i>indicus</i>
15	Lamiaceae	<i>Premna odorata</i> Blanco
16	Lamiaceae	<i>Vitex negundo</i> L.
17	Lauraceae	<i>Alseodaphne malabonga</i> (Blanco) Kosterm.
18	Lecythidaceae	<i>Barringtonia racemosa</i> (L.) Spreng.
19	Meliaceae	<i>Lansium domesticum</i> Corrêa
20	Meliaceae	<i>Sandoricum koetjape</i> (Burm. f.) Merr.
21	Moraceae	<i>Artocarpus blancoi</i> (Elmer) Merr.*
22	Moraceae	<i>Broussonetia luzonica</i> (Blanco) Bureau
23	Moraceae	<i>Ficus nota</i> (Blanco) Merr.
24	Moraceae	<i>Ficus pseudopalma</i> Blanco*
25	Moraceae	<i>Ficus septica</i> Burm.f.
26	Mrytaceae	<i>Syzygium tripinnatum</i> (Blanco) Merr.
27	Myrtaceae	<i>Syzygium polycephaloides</i> (C.B. Rob.) Merr.
28	Nyctaginaceae	<i>Pisonia grandis</i> R. Br.
29	Phyllanthaceae	<i>Antidesma bunius</i> (L.) Spreng.
30	Putranjivaceae	<i>Drypetes falcata</i> (Merr.) Pax & K. Hoffm.*
31	Rubiaceae	<i>Morinda citrifolia</i> L.
32	Sapindaceae	<i>Nephelium lappaceum</i> L.

Note: * indicates Philippine endemic species.

Carbon Storage Potentials of Trees

Tree Biomass and Carbon Stock per Area.

There was a total tree biomass of 2367.60 tons in North Poblacion and South Poblacion using the formula of Brown [20] while 2328.9 tons using the formula of [21] (Fig. 5). North Poblacion contributed a greater amount of tree biomass (Brown = 1540.4 tons; Chave 1497.82 tons) than South Poblacion (Brown 827.19 tons; Chave 831.07 tons). Among the areas surveyed, the municipal hall had the highest tree biomass using both formulas with a mean value of 765.28 tons using [20] and 694.43 tons using [21] (Fig. 6).

The study revealed an estimated tree carbon stock of 1183.8 tons (16.28 t/ha) using [20] and 1164.45 tons (16.01 t/ha) using [21] (Fig. 7). North Poblacion contributed an amount of 770.20 tons (22.02 t/ha) and 748.91 tons (21.41 t/ha) using [20] and [21], respectively. South Poblacion contributed an amount of 413.60 tons (10.96 t/ha) and 415.54 tons (10.94 t/ha) using [20] and [21], respectively (Fig. 8). Among the areas, municipal hall had the highest contribution 382.64 tons for [20] and 347.21 tons for [21]. This was highly anticipated due to its high biomass content which was the used in estimating the carbon stock of trees.

Table 3

Taxonomic list of threatened species in the area

No.	Family	Scientific Name	IUCN Redlist	DAO 2017-11
1	Anacardiaceae	<i>Koordersiodendron pinnatum</i> (Blanco) Merr.	–	OTS
2	Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i> L.	DD	–
3	Anacardiaceae	<i>Spondias purpurea</i> L.	LC	–
4	Annonaceae	<i>Annona muricata</i> L.	LC	–
5	Annonaceae	<i>Annona reticulata</i> L.	LC	–
6	Annonaceae	<i>Annona squamosa</i> L.	LC	–
7	Annonaceae	<i>Cananga odorata</i> (Lam.) Hook. f. & Thomson	LC	–
8	Apocynaceae	<i>Alstonia scholaris</i> (L.) R. Br.	LC	–
9	Apocynaceae	<i>Tabernaemontana pandacaqui</i> Poir.	LC	–
10	Euphorbiaceae	<i>Macaranga grandifolia</i> (Blanco) Merr.	VU	–
11	Euphorbiaceae	<i>Macaranga tanarius</i> (L.) Müll.Arg.	LC	–
12	Euphorbiaceae	<i>Melanolepis multiglandulosa</i> (Reinw. ex Blume) Rechb. & Zoll.	LC	–
13	Fabaceae	<i>Bauhinia purpurea</i> L.	LC	–
14	Fabaceae	<i>Cassia fistula</i> L.	LC	–
15	Fabaceae	<i>Erythrina variegata</i> L.	LC	–
16	Fabaceae	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth	LC	–
17	Fabaceae	<i>Intsia bijuga</i> (Colebr.) Kuntze	NT	VU
18	Fabaceae	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre	LC	–
19	Fabaceae	<i>Pterocarpus indicus</i> Willd. forma <i>echinatus</i> (Pers.) Rojo	EN	VU
20	Fabaceae	<i>Pterocarpus indicus</i> Willd. forma <i>indicus</i>	EN	VU
21	Fabaceae	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	LC	–
22	Fabaceae	<i>Tamarindus indica</i> L.	LC	–
23	Lamiaceae	<i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.	LC	–
24	Lamiaceae	<i>Vitex negundo</i> L.	LC	–
25	Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill.	LC	–
26	Lecythidaceae	<i>Barringtonia racemosa</i> (L.) Spreng.	LC	–
27	Malvaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn	LC	–
28	Malvaceae	<i>Hibiscus tiliaceus</i> L.	LC	–
29	Meliaceae	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	LC	–
30	Meliaceae	<i>Sandoricum koetjape</i> (Burm. f.) Merr.	LC	–
31	Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla</i> King	VU	–
32	Moraceae	<i>Artocarpus blancoi</i> (Elmer) Merr.	LC	–
33	Moraceae	<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	LC	–
34	Moraceae	<i>Ficus balete</i> Merr.	LC	–
35	Moraceae	<i>Ficus nota</i> (Blanco) Merr.	LC	–
36	Moraceae	<i>Ficus septica</i> Burm f.	LC	–
37	Moraceae	<i>Morus alba</i> L.	LC	–
38	Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i> L.	LC	–
39	Myrtaceae	<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	LC	–
40	Phyllanthaceae	<i>Antidesma bunius</i> (L.) Spreng.	LC	–
41	Putranjivaceae	<i>Drypetes falcata</i> (Merr.) Pax & K. Hoffm.	–	OTS
42	Rutaceae	<i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr.	LC	–
43	Sapindaceae	<i>Nephelium lappaceum</i> L.	LC	VU
44	Sapotaceae	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	LC	–

Table 4

Taxonomic list of invasive species in the area

Family	Scientific Name
Lamiaceae	<i>Gmelina arborea</i> Roxb. ex Sm.
Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla</i> King
Fabaceae	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit

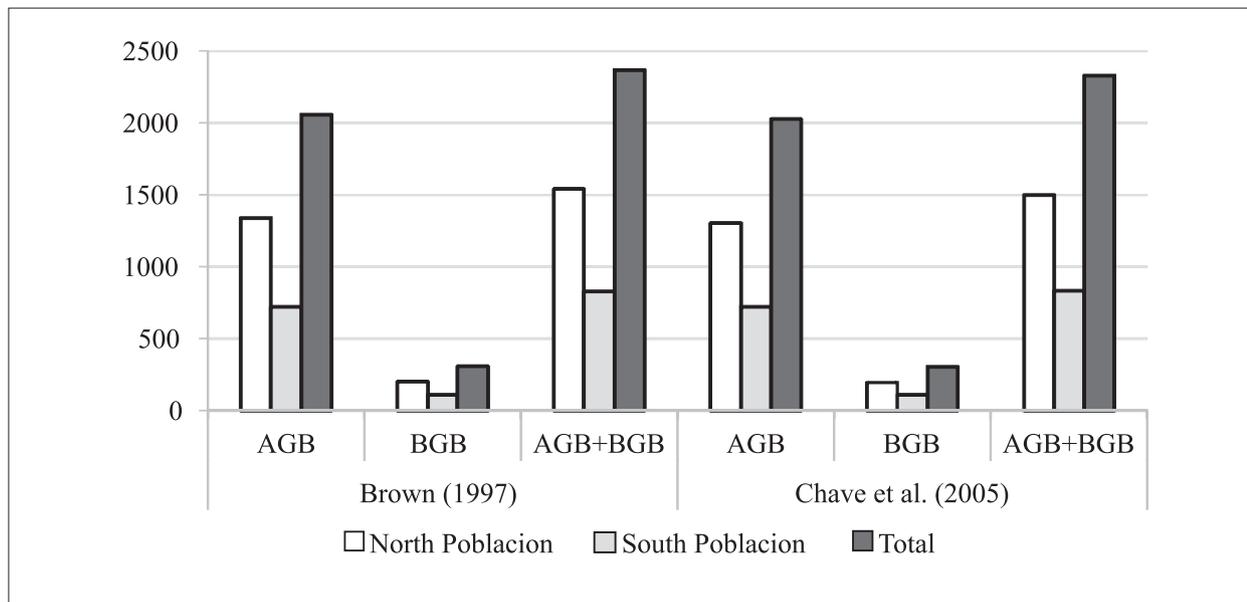


Fig. 5. Tree biomass (in tons) estimates for North Poblacion and South Poblacion

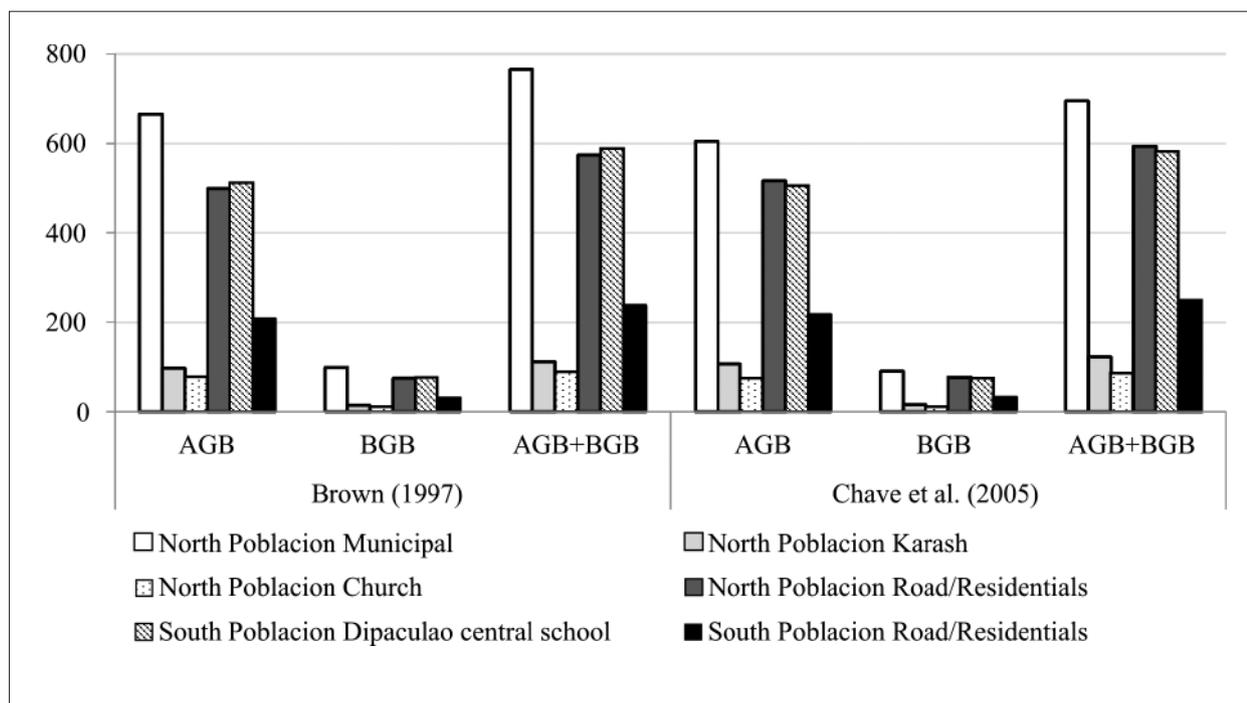


Fig. 6. Tree biomass (in tons) estimates in specific areas of the two barangays

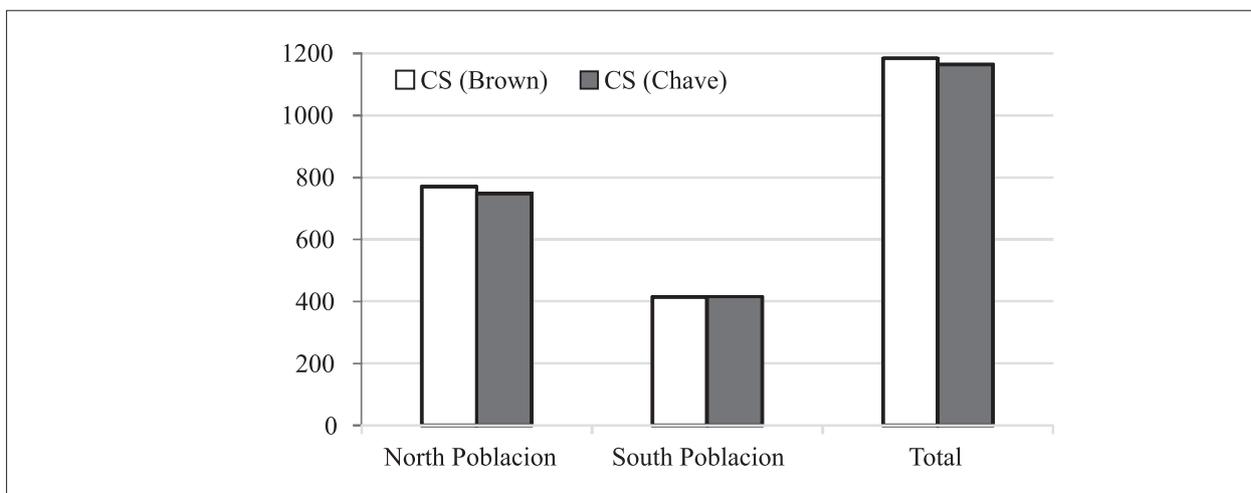


Fig. 7. Tree carbon stock (in tons) estimates in North Dipaculao and South Dipaculao

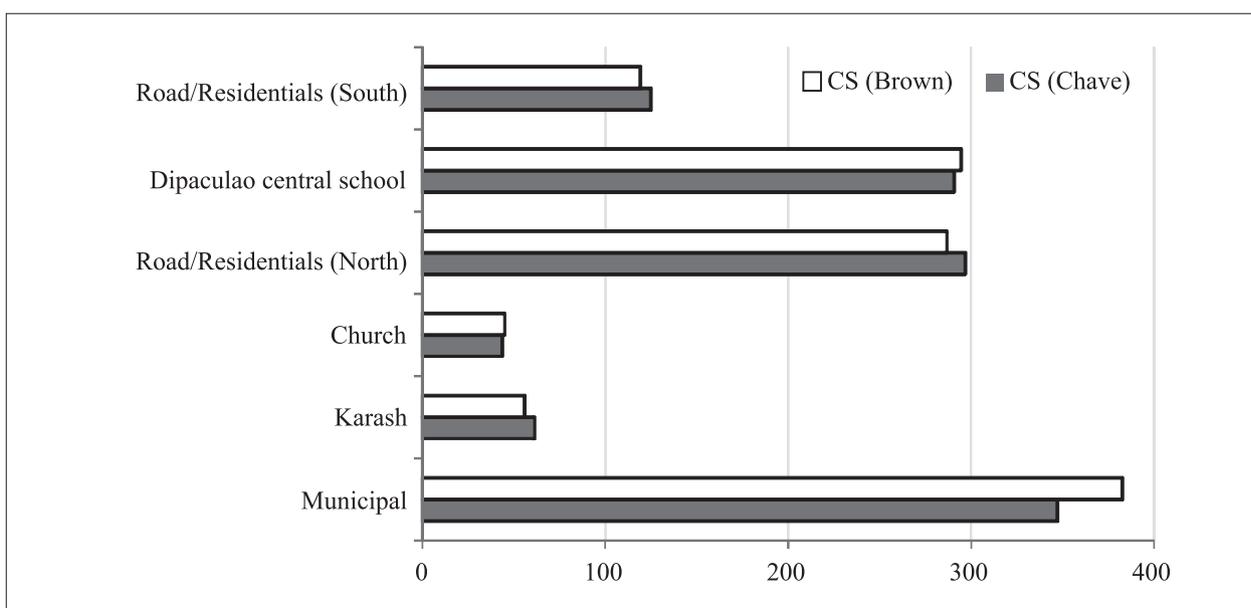


Fig. 8. Tree carbon stock (in tons) estimates in specific areas of two barangays

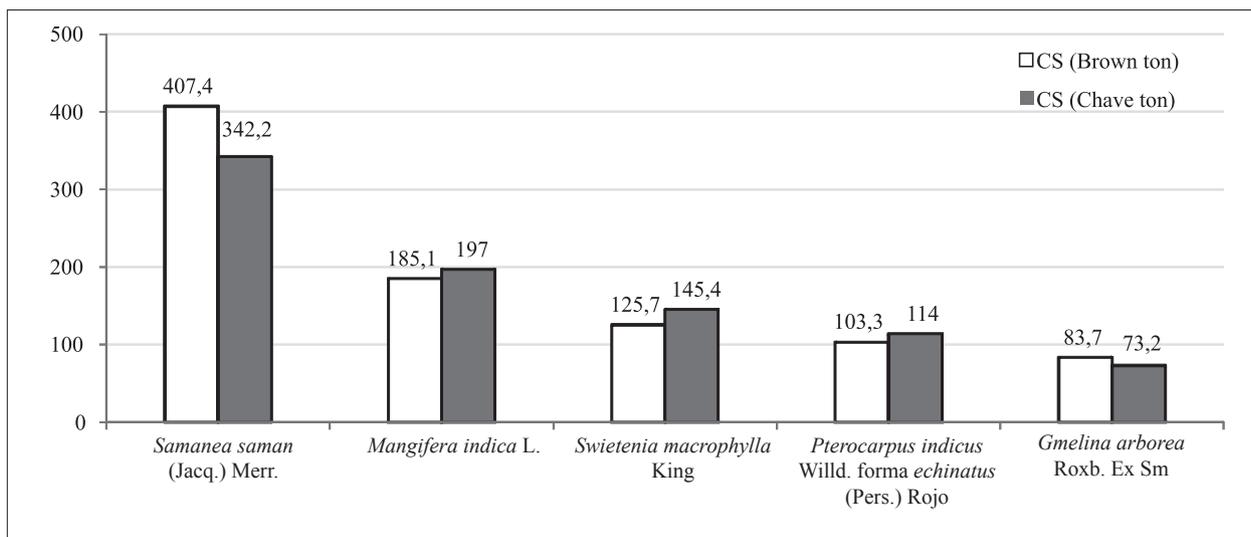


Fig. 9. Top 5 species in terms of carbon stock using [20, 21]

The results were compared with studies conducted in similar or closely similar areas in the Philippines. A study in Isabela State University Wildlife Sanctuary (ISUWS), Cabagan, Isabela revealed a carbon stock estimate of 47.50 t/ha [25]. Another study at the University of San Carlos – Talamban Campus' (USC-TC) Nature Park, Cebu City obtained a tree carbon stock of 36.21 t/ha for *Vitex parviflora* while 207.76 t/ha for *S. macrophylla* trees [26]. A in the urban areas of Cebu City revealed carbon stock value of 87.81 t/ha. Generally, the carbon stock in North Poblacion and South Poblacion are far lower than the urban areas mentioned [27].

Tree Carbon Stock per Species. Among the species, only five had obtained carbon stock potential or more than 50 tons (Fig. 9). *Samanea saman* (Jacq.) Merr or Rain Tree had the highest carbon storage potential of 407.4 tons using [20] and 342.2 tons using [21]. This was possible due to the large diameter of individual trees of *S. saman*. The largest tree in the whole area was Rain tree with DBH of 188.15 cm. Also, 49 out of 72 individuals of trees had DBH of more than 50 cm signifying the relatively large diameter composition of Rain Trees in the area.

Conclusion

The barangays were found to be highly diverse species home to a number of Philippine native, threatened, and endemic species. However, the overwhelming abundance of invasive species, particularly Mahogany and Gmelina poses serious threats to the remaining native species in the area. The carbon storage potential of trees in the area were generally lower than in other similar areas in the Philippines. The results of this study can be used as guide for the government to create management plan relating to species conservation and protection prioritizing the native, threatened and endemic species.

References

1. Nowak D., Hoehn R., Crane D. Oxygen Production by Urban Trees in the United States // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2007. V. 33. No. 3. P. 220–226. doi: 10.48044/jauf.2007.026
2. Bütler R., Lachat T., Larrieu L., Paillet Y. Habitat trees: key elements for forest biodiversity // *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. Germany: European Forest Institute, 2013. P. 84–91.

3. Wahlström M. The critical role of trees and forests in disaster risk reduction // *Unasylva*. 2015. V. 66. No. 1–2. P. 3–5.
4. Reed J., van Vianen J., Foli S., Clendenning J., Yang K., MacDonald M., Petrokofsky G., Padoch C., Sunderland T. Trees for life: The ecosystem service contribution of trees to food production and livelihoods in the tropics // *Forest Policy and Economics*. 2017. V. 84. P. 62–71. doi: 10.1016/j.forpol.2017.01.012
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of the World's Forest. FAO 2020 [Internet resource] <https://www.fao.org/state-of-forests/en/> (Accessed: 11.20.21).
6. Lüttge U., Buckeridge M. Trees: structure and function and the challenges of urbanization // *Trees*. 2020. V. 2020. No. 34. P. 1–8. doi: 10.1007/s00468-020-01964-1
7. Smail R.A. Forest land conversion, ecosystem services, and economic issues for policy: A review. Darby, Pennsylvania: DIANE Publishing, 2010. P. 1–40.
8. Chacalo A., Aldama A., Grabinsky J. Street tree inventory in Mexico City // *Journal of Arboriculture*. 1994. V. 20. P. 222–226.
9. Assefa G., Mangstu T., Gelu Z., Zewdie S. Forest carbon pools and carbon stock assessment in the context of SFM and REDD+. Wondo Genet, Ethiopia: Awassa University Wondo Genet College of Forestry and Natural Resources Training Manual, 2013. P. 1–69.
10. Coracero E.E., Malabrigo Jr. P.L. Diversity assessment of tree species in Sitio Dicasalarin, Barangay Zabali, Baler, Aurora, Philippines // *Open Journal of Ecology*. 2020. V. 10. No. 11. P. 717–728. doi: 10.4236/oje.2020.1011043
11. Dida J., Tiburan C. Aboveground biomass estimation of trees in the University of the Philippines Los Baños Campus, Philippines // *Sylvatrop*. 2020. V. 30. No. 2. P. 91–105. doi: 10.1093/jue/jux020
12. Kessler M., Keßler P.J., Gradstein S.R., Bach K., Schnull M., Pitopang R. Tree diversity in primary forest and different land use systems in Central Sulawesi, Indonesia // *Biodiversity & Conservation*. 2005. V. 14. No. 3. P. 547–560. doi: 10.1007/s10531-004-3914-7
13. Faridah-Hanum I., Philip L., Awang Noor A.G. Sampling species diversity in a Malaysian rain forest: The case of a logged-over forest // *Pakistan Journal of Botany*. 2008. V. 40. No. 4. P. 1729–1733.
14. Baynes J., Herbohn J., Chazdon R.L., Nguyen H., Firm J., Gregorio N., Lamb D. Effects of fragmentation and landscape variation on tree diversity in post-logging regrowth forests of the Southern Philippines // *Biodiversity and conservation*. 2016. V. 25. No. 5. P. 923–941. doi: 10.1007/s10531-016-1098-6
15. Fernando E.S. Forest formations and flora in the Philippines: Handout in FBS 21. Philippines: University of the Philippines College of Forestry and Natural Resources, 1998. (Unpublished).
16. Pelsler P., Barcelona J., Nickrent D. Co's digital flora of the Philippines. 2020 [Internet resource] <http://www.philippineplants.org> (Accessed: 10.15.2021).

17. Joshi R.C. Invasive alien species (IAS): concerns and status in the Philippines // Proceedings of the International Workshop on the Development of Database (APASD) for Biological Invasion. China: FFTC, 2006. 23 p.
18. IUCN. The IUCN Redlist of Threatened Species. IUCN, 2021 [Internet Resource] www.iucnredlist.org (Accessed: 10.16.2021).
19. DENR. DAO 2017-11. Philippines: DENR, 2017. 30 p.
20. Brown S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome: FAO, 1997. 87 p.
21. Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Folster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riera B., Yamakura T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests // *Oecologia*. 2005. V. 2005. No. 145. P. 87–99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
22. Galias D.C., Guerrero J.J., General M., Bañares E., Serrano J. Diversity of tree species within an urban forest fragment in Albay Province, Eastern Philippines // *Bicol University R & D Journal*. 2018. V. 21. No. 1. P. 33–44.
23. Tutor J.A.A., Paliyon A.M., Visco R.G., Castillo A.S., Militante E.P. Floristic composition, diversity of public green spaces in major urban cities in Western Visayas, Philippines // *West Visayas State University Research Journal*. 2017. V. 6. No. 2. P. 23–38.
24. Coracero E., Urriza H., Foster P. Species composition and diversity: baseline for tree conservation at Laguna State Polytechnic University, San Pablo, Philippines // *International Research Journal of Advanced Science*. 2021. V. 2. No. 1. P. 10–16.
25. Pascua J.G., Alfonso G.P., Galicia R.S. Carbon sequestration potential of tree species at Isabela State University Wildlife Sanctuary (ISUWS), Cabagan, Isabela, Philippines // *Open Journal of Ecology*. 2021. V. 11. No. 5. P. 462–473. doi: 10.4236/oje.2021.115030
26. Parilla R.B., Tamoso K.M.P., Jawad F.R.O. Carbon storage and sequestration by selected tree species in the University of San Carlos–Talamban Campus' (USC-TC) Nature Park, Cebu City, Philippines // *CNU Journal of Higher Education*. 2018. V. 12. P. 15–20.
27. Pansit N.R. Carbon storage and sequestration potential of urban trees in Cebu City, Philippines // *Mindanao Journal of Science and Technology*. 2019. V. 17. P. 98–111.

Лесоклиматические проекты в России: актуальное правовое обеспечение

© 2022. Е. М. Гордеева^{1,2,3}, д. ю. н., консультант,
И. Е. Ведерникова⁴, руководитель,

¹АО «Русский Алюминий Менеджмент»,
121096, Россия, г. Москва, ул. Василисы Кожиной, д. 1,

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

³Университет Хасселта,
3500, Бельгия, Мартеларенлаан, Хасселт Кампус, д. 42,

⁴Сахалинский государственный университет,
693000, Россия, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, д. 33,

e-mail: Elena.Gordeeva2@rusal.com, yelena.gordeeva@uhasselt.be,
em_gordeeva@vyatsu.ru

Достижение «климатической нейтральности» или «нулевых» выбросов парниковых газов (ПГ) остаётся одной из наиболее актуальных целей во всём мире. Сегодня, когда идёт активный процесс имплементации «Парижского соглашения» 2015 г. в национальные правовые системы, возникает множество практических вопросов, которые требуют решения как на национальном, так и на международном уровнях. Для Российской Федерации (РФ) актуальными являются вопросы о роли и значении лесов в достижении «углеродной нейтральности», о создании в стране условий для увеличения поглощения ПГ лесами, о реализации лесоклиматических проектов (ЛКП) на территории страны и признании достигнутых результатов на международном уровне. Цель настоящего исследования – проанализировать состояние дел в области правового обеспечения в РФ реализации именно ЛКП. Такие проекты являются лишь вспомогательным инструментом достижения «углеродной нейтральности», т. е. они лишь помогают компенсировать те выбросы ПГ, которых не удаётся избежать с помощью технологических решений. Популярность и количество таких проектов в мире растёт, на международных углеродных рынках растут цены на единицы сокращения выбросов, выпущенные в ходе реализации таких проектов. Парадоксальным образом в РФ, несмотря на колоссальный поглощающий потенциал лесов, тундры, земель сельскохозяйственного назначения, ЛКП почти нет. Исследование выявляет правовые вопросы, которые (пока) сдерживают более активную реализацию ЛКП в РФ, и предлагает решения, которые, по мнению авторов, могут способствовать запуску целой «индустрии» ЛКП в РФ в будущем.

Ключевые слова: экологическое право, изменение климата, Парижское соглашение 2015 года, углеродная нейтральность, лесоклиматические проекты.

Forest carbon offsets in Russia: current legal infrastructure

© 2022. Y. M. Gordeeva^{1,2,3} ORCID: 0000-0003-4337-6721¹

I. E. Vedernikova⁴ ORCID: 0000-0002-1470-2260²

¹Directorate of Sustainable Development RUSAL,
1, Vasilisy Kozhinoy St., Moscow, Russia, 121096,

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Hasselt University,
42, Campus Hasselt, Martelarenlaan, Belgium, 3500,

⁴Sakhalin State University,
33, Prospekt Kommunistichesky, South-Sakhalin, Russia, 693000,

e-mail: Elena.Gordeeva2@rusal.com,
yelena.gordeeva@uhasselt.be, em_gordeeva@vyatsu.ru

Achieving “climate neutrality” (or “net-zero greenhouse gas (GHG) emissions”) remains as one of the most relevant targets worldwide. Yet, today, when countries implement the Paris Agreement into their national legal systems, important practical questions arise and call for solutions both at the international and national levels. For the Russian Federation, the role of forests in achieving “carbon neutrality”, the creation of conditions in the country for increasing the absorption of GHG by forests, the implementation of forest climate projects (FCP) in the country and the recognition at the international level of the results achieved by such projects – are of particular significance. The purpose of this study is to analyze the state of the current legal infrastructure in the Russian Federation on the implementation of the FCP. Such projects serve as a supplementary tool for achieving “carbon neutrality”, i. e. they only help to offset those GHG emissions that cannot be avoided by technological solutions. At the international level, the popularity and the number of such projects are growing, as well as prices for emission reduction units issued during the implementation of such projects in international carbon markets are rising. Paradoxically, in the Russian Federation, despite the colossal absorbing potential of forests, tundra, agricultural lands, there is almost no FCP. The study identifies legal issues that (up until now) have been holding back a more active implementation of the FCP in the country, and proposes solutions that, in the opinion of the authors, may contribute to the launch of an entire “industry” of the FCP in the Russian Federation in the future.

Keywords: environmental law, climate change, 2015 Paris Agreement, climate neutrality, forest carbon offset projects.

В настоящее время международно-правовой режим, направленный на охрану глобального климата, включает в себя следующие основные правовые инструменты: Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН, открыта для подписания в ходе Конференции ООН по окружающей среде и развитию 1992 г., вступила в силу 21 марта 1994 г.) [1], Киотский протокол (КП) к РКИК ООН (принят на 3-й Конференции сторон РКИК ООН в 1997 г., вступил в силу 16 февраля 2005 г.) [2] и Парижское соглашение (ПС, принято 12 декабря 2015 г., вступило в силу 4 ноября 2016 г.) [3]. Учёные отмечают, что сегодня, когда идёт активный процесс имплементации международно-правового режима по охране климата в национальные правовые системы, возникает множество практических вопросов, которые требуют решения как на международном, так и на национальном уровнях [4–7]. Одним из ключевых вопросов с момента принятия Парижского соглашения остаётся вопрос о роли и значении лесов в достижении «углеродной нейтральности» [8–11].

Для Российской Федерации (РФ) вопрос о роли и значении лесов в достижении «углеродной нейтральности» особенно важен. Леса России играют неопределимую роль на глобальном уровне, предоставляя широкий спектр экосистемных услуг (в том числе, поддержание климата) [12]. «Россия обладает колоссальным поглощающим потенциалом лесов, тундры, сельхозземель, болот... Значимость природного потенциала России для обеспечения климатической устойчивости планеты в целом огромная, колоссальная...» [13]. По данным ФГБУ «Рослесинфорг» ежегодно леса России поглощают до 1,6 млрд т CO₂; лидером по общему запасу углерода являются леса Сибири – 13,8 млрд т CO₂ [14].

Парижское соглашение по климату было принято РФ с заявлениями, подчёркивающими позицию страны о важности охраны лесов и иных экологических систем, о необходимости увеличения их поглощающей способности, а также в отношении необходимости максимально учитывать эту поглощающую способность в процессе имплементации механизмов соглашения [15]. На 26-й Конференции сторон РКИК ООН, состоявшейся в период с 31 октября по 13 ноября 2021 г. в г. Глазго (Великобритания), Россия присоединилась к декларации по лесам и землепользованию, которую подписали более 100 стран, на долю которых приходится более 85% лесов мира [16].

Цель настоящего исследования – проанализировать состояние дел в области правового обеспечения реализации в РФ лесоклиматических проектов (ЛКП). Такие проекты являются вспомогательным инструментом достижения «углеродной нейтральности», т. е. они лишь помогают компенсировать те выбросы ПГ, которых не удаётся избежать с помощью технологических решений. Популярность и количество ЛКП в мире растёт, а также растут цены на единицы сокращения выбросов (ЕСВ), выпущенные в ходе реализации таких проектов на международных углеродных рынках. Парадоксальным образом в РФ, несмотря на «колоссальный поглощающий потенциал лесов, тундры, сельхозземель...» [13], ЛКП почти нет.

Объекты и методы исследования

Объектом настоящего исследования является правовое регулирование в области охраны климата. Предмет исследования – нормы, регулирующие отношения, специфика которых обусловлена реализацией ЛКП. Методологи-

ческой основой данного исследования являются диалектический метод научного познания, методы и приёмы формальной логики, а также частнонаучные методы: сравнительное правоведение, системно-структурный и формально-юридический. Эмпирическую основу исследования составили международно-правовые акты (международные договоры универсального характера и акты международных организаций) и акты национального права РФ, регулирующие отношения по реализации ЛКП. В числе информационных источников настоящего исследования использованы отчёты, статистические материалы и доклады международных организаций, национальных органов власти, а также аналитические отчёты и материалы конференций по вопросам изменения климата, устойчивого использования, охраны и защиты лесов, представленные на официальных сайтах в сети Интернет. Подбор информационных материалов осуществляли по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate) и eLIBRARY.RU. Поиск материалов проводили по ключевым словам в поисковой системе «Яндекс». Охвачен временной период с момента принятия РКИК ООН в 1992 г. до настоящего времени. Основные результаты исследования были представлены на научно-практическом семинаре «Новое в лесном законодательстве 2022» (г. Киров, март 2022), а также на XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» в апреле 2022 г. [17].

Глобальные углеродные рынки и лесоклиматические проекты

В целях охраны климата стабилизация концентрации ПГ в атмосфере должна быть достигнута при помощи технологий, методов и процессов, приводящих к ограничению, снижению или прекращению антропогенных выбросов ПГ [1, ст. 4]. Вспомогательным инструментом достижения «климатической нейтральности» являются «климатические проекты» (комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов ПГ или увеличение поглощения ПГ [18]). С 2005 г., когда вступил в силу КП к РКИК ООН, развиваются международные углеродные рынки.

В основе концепции углеродного рынка лежит представление о том, что независимо

от своего происхождения ПГ, накапливаясь в атмосфере, оказывают негативное воздействие на климатическую систему в глобальном масштабе; соответственно, сокращение выбросов ПГ, где бы оно ни происходило, служит смягчению климатических изменений [19]. Сегодня существуют два вида международных углеродных рынков: обязательный/регулируемый и добровольный [20].

Регулируемый углеродный рынок – это биржевой рынок торговли квотами, регулируемый обязательными международными и региональными механизмами сокращения выбросов ПГ. Целью обязательного рынка, как правило, является исполнение национальных целей в рамках международно-правового режима по охране климата (и, в том числе, в рамках ПС). Так, например, по данным секретариата РКИК ООН по состоянию на 30 марта 2022 г. зарегистрировано 7849 проектов чистого развития (СДМ) [21]. От общего числа СДМ проектов ЛКП составляют менее 1% [22]. Реализация ЛКП (проекты в секторе «сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования» (сектор «Землепользование») [6]) по правилам международного углеродного рынка осложняется тем, что правила исполнения таких проектов до сих пор обсуждаются.

Одним из основных драйверов развития международно регулируемого углеродного рынка является Европейская схема торговли выбросами (European Union Emission Trading Scheme, EU ETS), которая была введена в странах-членах Европейского Союза (ЕС) в 2005 г. в соответствии с Директивой Европарламента и Европейского Совета 2003/87/ЕС [23]. Система торговли выбросами – это система, в которой эмитенты (энергетические компании, крупные производственные потребители энергоресурсов и т. д.) могут торговать единицами выбросов для достижения своих целевых показателей. Чтобы выполнить свои целевые показатели по эмиссиям с наименьшими затратами, компании могут либо реализовывать внутренние меры по снижению выбросов, либо приобрести единицы выбросов на углеродном рынке в зависимости от относительной стоимости этих вариантов. Создавая спрос и предложение на единицы выбросов, EU ETS устанавливает рыночную цену на эмиссию ПГ [24]. Сегодня реализуется уже четвёртая фаза EU ETS – до 2030 г. [25].

В ЕС установлены общие для всех стран-участниц правила учёта выбросов ПГ в секторе «землепользование» [26]. Учёт

выбросов и поглощений в секторе «землепользование» ведётся по «бездебетовому» правилу («No-debit rule»): все выбросы ПГ в секторе «землепользование» должны быть компенсированы соответствующими поглощениями ПГ в этом же секторе. Другими словами, если страна-член ЕС вырубает лес, то эта страна должна компенсировать выбросы ПГ, связанные с обезлесением, либо через посадку леса (облесение), либо через другие разрешённые мероприятия именно в секторе «землепользование». По состоянию на март 2022 г. законодательством ЕС использование результатов поглощений в секторе «землепользование» для компенсации выбросов в секторах EU ETS (т. е. для компенсации выбросов в таких секторах, как «энергетика», «промышленность», «коммерческая авиация на Европейском экономическом пространстве» и в других секторах EU ETS) не предусмотрено.

Что касается РФ, в нашей стране в 2020 г. начата реализация пилотного проекта на Сахалине [27]. Для Сахалина установлена цель – достижение углеродной нейтральности до 31 декабря 2025 г. На уровне этого субъекта РФ проводится инвентаризация выбросов и поглощения ПГ, внедряется квотирование выбросов ПГ регулируемых организаций. К задачам эксперимента отнесены: стимулирование внедрения технологий, направленных на сокращение выбросов ПГ и увеличение их поглощения, формирование системы независимой верификации сведений и данных о выбросах и поглощении ПГ, а также создание системы обращения углеродных единиц и единиц выполнения квот. В рамках эксперимента предусмотрена реализация климатических (в том числе и лесных) проектов, однако их отдельное регулирование (пока) отсутствует. В будущем эксперимент могут распространить и на другие регионы РФ (например, о желании участвовать в эксперименте заявила Иркутская область).

Добровольный углеродный рынок – это внебиржевой рынок торговли сертификатами за реализацию проектов по сокращению выбросов или поглощению CO₂, регулируемый некоммерческими организациями. Основным драйвером добровольного рынка являются эмитенты, которые добровольно принимают на себя обязательства по сокращению ПГ или по нейтрализации своего «углеродного следа» (обеспечению углеродной нейтральности). Как правило, целью добровольного углеродного рынка является достижение корпоративных

целей по углеродной нейтральности (реже – выполнение компаниями обязательств в рамках ETS). В отличие от КП и систем квотирования и торговли выбросами, которые предъявляют единые требования к углеродным проектам, добровольный углеродный рынок более гибок, на рынке допускается многообразие стандартов и возможность выбора стандарта, наиболее подходящего к тому или иному проекту. В настоящее время для верификации добровольных углеродных проектов применяются такие стандарты, как Верифицированный углеродный стандарт (Verified Carbon Standard, VCS [28]), Стандарты разработки проектов в области климата, развития местных сообществ и биоразнообразия (Climate Community & Biodiversity Standards, CCB [29]), Золотой стандарт (Gold Standard) [30] и другие. Все эти стандарты опираются во многом на те же подходы, требования и критерии, которые применялись к углеродным проектам в рамках КП, но и имеют существенные отличия, заполняя регуляторные пустоты, оставленные киотскими механизмами.

На добровольном международном рынке лидером по объёму сделок являются климатические проекты категории «Лесное хозяйство и землепользование» [31]. Цены на карбоновые единицы, выпущенные в ходе реализации таких проектов, сегодня активно растут. Рост цен и популярность таких проектов на международном уровне можно объяснить тем, что такие проекты относят к категории «природных решений» (Nature-based solution, NBS), помимо собственно климатического эффекта, такие проекты обеспечивают «сопутствующие выгоды» (например, охрану биологического разнообразия и др. [32]).

Лесоклиматические проекты России

По состоянию на март 2022 г. в РФ реализовано пять ЛКП: 1) Бикинский ЛКП [33], реализованный по методологии VCS. Данный проект оценён с точки зрения стандарта CCB и зарегистрирован как проект «Совместного осуществления» (JI) в рамках международно-правового режима по охране климата [34]; 2) «Поглощение углерода путём лесоразведения в отдалённых районах сибирского региона Российской Федерации»; 3) Кедровый ЛКП [35]; 4) Проект по лесовосстановлению ОК «Русал» [36]; 5) Проект по авиалесоохране ОК «Русал» [36]. Важно также отметить, что на острове Сахалин, где реализуется эксперимент по ограничению выбросов ПГ [27], в рамках

эксперимента разрешён зачёт результатов ЛКП в квоты предприятий, в настоящее время там ведётся активная подготовка к реализации ЛКП [37].

Лесоклиматические проекты в России: актуальное правовое обеспечение

К стратегическим документам РФ, отмечающим роль лесов в достижении Россией углеродной нейтральности, относятся «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в РФ на период до 2030 года» [38], «Стратегия развития лесного комплекса РФ до 2030 года» [39] и «Климатическая доктрина РФ» [40]. В стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г. определены меры по обеспечению сокращения выбросов ПГ к 2030 г. до 70% относительно уровня 1990 г. с учётом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития РФ, а также определены направления и меры развития с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г. [41]. В соответствии с Проектом плана мероприятий (операционный план) реализации стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов ПГ в период до 2024 г. планируется активная работа, направленная на разработку специального регулирования для стимулирования реализации климатических проектов в области лесных отношений (в том числе, внесение соответствующих изменений в Лесной Кодекс РФ в части реализации климатических проектов, разработка специального постановления Правительства РФ «О реализации климатических проектов в лесах» (в том числе, утверждающего порядок, правила, формы отчётности и особенности осуществления мероприятий по охране, защите и воспроизводству лесов), внесение изменений в законодательство в части использования земель сельскохозяйственного назначения, непригодных для сельского хозяйства, для реализации климатических проектов [42].

Основы правового регулирования отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая сопровождается выбросами ПГ, установлены Федеральным законом «Об ограничении выбросов парниковых газов» [43]. Целью Закона является создание условий для устойчивого и

сбалансированного развития экономики РФ при снижении уровня выбросов ПГ. Закон, в частности, предусматривает, что целевой показатель сокращения выбросов ПГ для экономики РФ устанавливается Правительством РФ в соответствии с указами Президента РФ и документами стратегического планирования, разрабатываемыми в рамках целеполагания на федеральном уровне, с учётом поглощения ПГ в лесах и иных естественных экологических системах и исходя из необходимости обеспечения устойчивого и сбалансированного развития экономики РФ. Закон вводит понятие «климатический проект», вводит общее регулирование климатических проектов и порядок введения в обращение углеродных единиц. По состоянию на март 2022 г. ведётся разработка проектов подзаконных актов, принятие которых предусматривается в Законе, в том числе, проект приказа Минэкономразвития РФ «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам, формы и порядка предоставления отчёта о реализации климатического проекта» [44].

Заключение

В настоящее время активно идёт процесс имплементации международно-правового режима по охране климата в национальные правовые системы. В связи с этим возникает множество практических вопросов, которые требуют решения как на международном, так и на национальном уровнях. Для РФ особенно важным остаётся вопрос о роли и значении лесов в достижении «углеродной нейтральности».

Лесоклиматические проекты являются вспомогательным инструментом для достижения глобальной цели «нулевых выбросов» ПГ. Регулирование реализации таких проектов на международном уровне развивается по двум направлениям – в рамках обязательных и добровольных углеродных рынков. Развитие такого регулирования точно продолжится и в ближайшем будущем. Можно предположить, что будет происходить конвергенция различных углеродных рынков, а после активации статьи 6 ПС, станет реальностью и глобализация углеродного рынка и, как следствие, унификация международного регулирования, в том числе и в области ЛКП. Можно ожидать,

что глобальная климатическая повестка продолжит формироваться таким образом, что климатические проекты по лесам будут иметь особенно большую ценность.

Сегодня ЛКП наиболее востребованы на добровольных углеродных рынках. Основными участниками таких рынков являются эмитенты, которые добровольно берут на себя обязательства по сокращению ПГ или по нейтрализации своего «углеродного следа». Верификация таких ЛКП происходит по международным добровольным стандартам и методологиям.

В РФ по состоянию на март 2022 г. реализовано всего пять ЛКП, но только один – «Бикинский проект» (Л) реализован по международной методологии VCS и оценён с точки зрения международного стандарта ССВ. Дефицит реализованных и верифицированных ЛКП в России можно объяснить пробелами в действующем законодательстве как на международном, так и на национальном уровнях.

В конце 2021 г. в России начала активно формироваться соответствующая правовая база: принята национальная стратегия низкоуглеродного развития до 2050 г., разработан проект её реализации, принят Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов». В сентябре 2022 г. вступит в силу закон о проведении эксперимента на Сахалине, впоследствии планируется распространение эксперимента и на другие регионы РФ. Ожидаемыми шагами, по мнению авторов, могут стать и включение в ст. 25 Лесного кодекса РФ нового вида аренды в целях реализации ЛКП, и снятие противоречий в законодательстве о землях сельскохозяйственного назначения (в том числе, ст. 78 п. 4 Земельного кодекса) путём включения ЛКП в число разрешённых видов деятельности. Такие изменения позволят легализовать переход прав собственности на ЕСВ и реализацию ЛКП на землях сельскохозяйственного назначения. Важным шагом на пути развития правовой инфраструктуры станет разработка и утверждение методологий ЛКП, соответствующих международным требованиям и позволяющих реализовать ЛКП на территории РФ. Реализация обозначенных решений уже в ближайшем будущем может, по мнению авторов статьи, способствовать запуску целой «индустрии» ЛКП в России.

References

1. United Nations Convention on Climate Change (UNFCCC), adopted 9 May 1992, in force 21 March 1994 [Internet resource] <https://www.un.org/ru/documents/>

decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (Accessed: 12.06.2021) (in Russian).

2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, adopted 10 December 1997, in force 16 February 2005 [Internet resource] <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf> (Accessed: 09.03.2022).

3. Paris Agreement, adopted 12 December 2015, in force 04 November 2016 [Internet resource] https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (Accessed: 05.06.2021) (in Russian).

4. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223

5. Domrachev D.G., Kirillovych A.A. The legal regime for limiting greenhouse gas emissions as a climate protection tool // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 191–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-191-197

6. Gordeeva Y.M., Pugach V.N. The Paris Agreement and “Climate neutrality” the role for “Agriculture, forestry and other land use” sector // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227

7. Gershinkova D. Unresolved issues of Article 6 of the Paris Agreement – Is a compromise possible in Glasgow? // *International Organizations Research Journal*. 2021. V. 16. No. 3. P. 69–84 (in Russian). doi: 10.17323/1996-7845-2021-03-03

8. De Andrade Correa F., Voigt Ch. The Paris Agreement and net-zero emissions, what role for the land-sector? // *Carbon & Climate Law Review*. 2021. V. 15. No. 1. Article No. 2. doi: 10.21552/cclr/2021/1/3

9. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A. On the potential of greenhouse gas absorption by forests of Russia to reduce the carbon footprint of domestic products export // *Reports of the Russian Academy of Science. Earth Sciences*. 2021. V. 499. No. 2. P. 181–184 (in Russian). doi: 10.31857/S2686739721080120

10. Zwick S. Article 6 and its Glasgow Rulebook: the Basics // *Ecosystem Marketplace, A Forest Trends Initiative* [Internet Resource] <https://www.ecosystemmarketplace.com/articles/article-6-and-its-glasgow-rulebook-the-basics/> (Accessed: 09.03.2022).

11. Favasuli S. Debate on avoidance and REDD+ carbon projects to dominate the next UN Climate Conference [Internet resource] <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/market-insights/blogs/energy-transition/011222-redd-carbon-credits-cop27> (Accessed: 09.03.2022).

12. Nemova V. Improvement of integrated forest management in Russia at the regional level // *Trends and management*. 2017. No. 3. P. 33–59 (in Russian). doi: 10.7256/2454-0730.2017.3.24161

13. Putin V. Plenary session of the St. Petersburg International Economic Forum 4 June 2021 [Internet resource] <http://www.kremlin.ru/events/president/news/65746> (Accessed: 12.06.2021) (in Russian).

14. Roslesinforg. How much carbon do Russian forests really sequester? [Internet resource] <https://roslesinforg.ru/news/all/4218/> (Accessed: 09.03.2022) (in Russian).

15. United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII, Environment, Paris Agreement, Russian Federation Declaration [Internet resource] https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtmsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en#EndDec (Accessed: 12.06.2024).
16. United Nations Climate Change Conference UK 2021. Glasgow Leaders' Declaration on Forests and Land Use [Internet resource] <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/> (Accessed: 09.03.2022).
17. Gordeeva Y.M., Dresvyannikova K.D., Vokueva E.E. Carbon forestry offset projects as a tool for decarbonization of Russian regions: current legal infrastructure // Environment of the native region: challenges and ways forward. Materialy XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. 2022. Book 1. P. 16–19 [Internet resource] <http://envjournal.ru/ecolab/sbor/2244.pdf> (Accessed: 03.05.2022) (in Russian).
18. Russian Federation, Federal Law. On limiting GHG emissions, 296 – Federal Law [Internet resource] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47013> (Accessed: 27.05.2022) (in Russian).
19. Yulkin M.A., Dyachkov V.A., Samorodov A.V., Kokorin A.O. Voluntary systems and standards of GHG emission reductions. 12 p. [Internet resource] https://wwf.ru/upload/iblock/e9e/uglerod_rynok_web_1.pdf (Accessed: 10.03.2022) (in Russian).
20. GreenEcoInvest. International practice of CO₂ emissions reductions [Internet resource] <https://greenecoinvest.ru/analytics> (Accessed: 10.03.2022) (in Russian).
21. UNFCCC. About CDM [Internet resource] <https://cdm.unfccc.int/Statistics/Public/CDMinsights/index.html> (Accessed: 30.03.2022).
22. UNEP. CDM projects by type [Internet resource] <http://cdmpipeline.org/cdm-projects-type.htm#3> (Accessed: 30.03.2022).
23. European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2003/87/EC [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:275:0032:0046:en:PDF> (Accessed: 10.03.2022).
24. Ivanov N.A. The World carbon market is at its birth [Internet resource] <https://preprints.ru/files/612> (Accessed: 10.03.2022) (in Russian).
25. European Commission. Revision for phase 4 (2021–2030) [Internet resource] https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030_en (Accessed: 10.03.2022).
26. European Commission, Regulation (EU) 2018/841 [Internet resource] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/AUTO/?uri=CELEX:02018R0841-20210314> (Accessed: 10.03.2022).
27. Federal Law. On carrying out an experiment on limiting GHG emissions in selected regions of the Russian Federation [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203060003> (Accessed: 10.03.2022) (in Russian).
28. Verra. Verified Carbon Standard [Internet resource] <https://verra.org/project/vcs-program/> (Accessed: 10.03.2022).
29. Verra. Climate. Community and Biodiversity [Internet resource] <https://verra.org/project/ccb-program/> (Accessed: 10.03.2022).
30. Gold Standard. For a climate secure and sustainable world [Internet resource] <https://www.goldstandard.org/> (Accessed: 10.03.2022).
31. Ecosystem Marketplace. Markets in motion, 2021 [Internet resource] <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2021/> (Accessed: 30.01.2022).
32. WWF. WWF position on forest offset projects [Internet resource] <https://wwf.ru/about/positions/lesoklimaticheskie-proekty/> (Accessed: 30.01.2022) (in Russian).
33. WWF. Bikin offset project [Internet resource] https://wwf.ru/upload/iblock/3a/bikinskii_klimaticheskii_proekt_1.pdf (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
34. UNFCCC. Bikin Tiger Carbon project [Internet Resource] https://ji.unfccc.int/JI_Projects/DB/ULD-19J1NDCZQ6A5GRW1ZC5C2A17CE0/Determination/TUEV-SUED1350992513.26/viewDeterminationReport.html (Accessed: 14.03.2022).
35. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. Bikin and Cedar forest offset projects: results of Russian–German cooperation in the Far East [Internet resource] https://amurinfocenter.org/upload/iblock/165/kedrovyy_proekt_fin_interactive_version.pdf (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
36. EnPlus Group. Pathway to net zero 2021 [Internet resource] https://enplusgroup.com/upload/iblock/fe0/EN_Pathway-to-net-zero.pdf (Accessed: 14.03.2022).
37. Vedernikova I. Necessary conditions for launching the industry of forest climate projects in the Russian Federation, 16 February 2022 [Internet resource] https://www.ng.ru/economics/2022-02-18/100_174118022022.html (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
38. Russian Federation Government. Basics of State Politics [Internet resource] http://www.mnr.gov.ru/docs/ofitsialnye_dokumenty/131500/?special_version=Y (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
39. Russian Federation Government. Forestry Development Strategy [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
40. Russian Federation President. Climate Doctrine [Internet resource] <http://kremlin.ru/events/president/news/6365> (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
41. Russian Federation Government. Low-carbon development strategy [Internet resource] <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
42. Russian Federation Government. Low-carbon development strategy implementation plan [Internet resource] <https://energiavita.ru/wp-content/uploads/2022/02/operplan-1.pdf> (Accessed: 14.03.2022) (in Russian).
43. Federal Law. On limiting GHG emissions [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (Accessed: 30.03.2022) (in Russian).
44. Russian Federation Ministry of Economic Development. Proposal for a Decree [Internet resource] <https://regulation.gov.ru/projects#npa=122519> (Accessed: 30.03.2022) (in Russian).

Хозяйственное использование и сохранение водных биологических ресурсов в России: проблемы правового регулирования

© 2022. А. М. Торцев, к. б. н., н. с.,

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, 163000, Россия, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, д. 23, e-mail: torzevalex@yandex.ru.

Водные животные и растения являются важной частью экосистем и вовлечены человеком в качестве ресурса в хозяйственный оборот. Использование водных биологических ресурсов (далее – водных биоресурсов) является важным источником доходов и благосостояния прибрежных сообществ, а также драйвером социально-экономического развития регионов. В настоящее время регулирование сферы использования водных биоресурсов предполагает сбалансированное хозяйственное освоение ресурсов на долгосрочной основе при сохранении их для удовлетворения потребностей будущих поколений. При этом хозяйственное использование водных биоресурсов можно подразделить на прямое – рыболовство, и косвенное – при использовании акватории и берегов водных объектов. Целью работы является исследование правового регулирования сферы использования водных биоресурсов, выявление проблем и предложение путей их решения. По итогам анализа норм права и научных публикаций, а также интервью с хозяйствующими субъектами показана множественность проблем в регулировании хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов, включая взаимодействие различных отраслей права и внутриведомственных документов. Дальнейшее совершенствование норм регулирования использования водных биоресурсов целесообразно проводить посредством создания межотраслевых экспертных групп с привлечением специалистов различного направления и заинтересованных сторон в рамках проектного управления, а также проведение верификации разрабатываемых норм регулирования с уже действующим законодательством. Кроме того, естественным выглядит совершенствование договорного права в сфере использования водных биоресурсов. Таким образом, гармонизация регулирования хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов позволит снять излишние административные барьеры для развития бизнеса и в то же время сохранить природные ресурсы.

Ключевые слова: водные биоресурсы, хозяйственное использование, правовое регулирование.

Problems of legal regulation of commercial use and conservation of fishery resources

© 2022. А. М. Tortsev ORCID: 0000-0002-2329-0042

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, 23, Northern Dvina Embankment, Arkhangelsk, Russia, 163000, e-mail: torzevalex@yandex.ru

Fish, aquatic animals and plants are an important part of ecosystems. They are involved as a resource in economic activity by humans. The fishery resources are an important source of income and welfare of coastal communities and a driver of the socio-economic development of the regions. Balanced long-term management and conservation of fisheries resources for future generations is the basis for regulating commercial activities. Fishery resources are an element of direct and indirect economic activity of entrepreneurs who carry out fishing and use the shores of water areas. The study of the legal regulation of the use of fishery resources, identifying problems and suggesting ways to solve them is the aim of the research. The methods of content analysis, systematization and structuring of information were used in the research. Analysis of legal norms and scientific publications, interviews with economic entities were carried out. The study of the regulation of economic activity revealed a multiplicity of problems associated with the interaction of various branches of law and departmental documents in the field of fishery resources. We have prepared proposals for the development of regulatory standards, including: the creation of intersectional expert groups with the involvement of specialists in various fields and stakeholders, verification of the developed regulatory standards and improvement of contract law in the use of fishery resources. Thus, harmonization of economic regulation will remove administrative barriers to economic growth and preserve natural resources at the same time.

Keywords: fishery resources, commercial activity, legal regulation.

Водные биоресурсы играют важную роль в поддержании баланса экосистем, а также в развитии и обеспечении продовольственной безопасности страны. С одной стороны, они являются источником продовольствия, способствуют созданию рабочих мест и экономическому росту страны. В 2017 г. общемировые уловы водных биоресурсов составили 92500 тыс. т, выращено 80100 тыс. т продукции аквакультуры, а общая стоимость продаж рыбной продукции достигла 383 млрд долларов США [1]. Однако избыточная добыча водных биоресурсов и загрязнение вод способствуют нанесению существенного вреда популяциям рыб. Следует отметить, что с 1990 г. примерно 25% водных биоресурсов используется чрезмерно, что приводит к истощению их запасов [2].

Необходимо отметить, что термин «водные биоресурсы» весьма широк и включает в себя рыб, водных беспозвоночных, водных млекопитающих, водоросли, других водных животных и растений, находящихся в состоянии естественной свободы. В то же время в зарубежной практике зачастую используют практически аналогичный по содержанию термин «рыбные ресурсы» (fishery resources) [3].

Взгляды на регулирование сферы использования водных биоресурсов сформировались не сразу и в историческом аспекте прошли сложный путь: от полного отрицания необходимости регулирования до создания сложной системы регуляторных норм в использовании ресурсов. Однако постепенно, в связи с увеличением антропогенного влияния на водные биоресурсы вследствие повышения их использования как источника продовольствия, происходит осознание ограниченности рыбных запасов и необходимости их сохранения, что послужило расширению мер по регулированию использования водных биоресурсов посредством установления ряда ограничений на их эксплуатацию. Так, например, избыточный вылов трески у побережья острова Ньюфаундленд привёл к существенному сокращению популяции трески, что, соответственно, повлекло снижение уловов и запрет на её лов [4]. Социально-экономическими последствиями перелома трески стали закрытие рыбооловецких предприятий и сокращение почти 40 тыс. рабочих мест в рыбохозяйственном комплексе [5].

В настоящее время регулирование сферы использования водных биоресурсов предполагает сбалансированное хозяйственное освоение ресурсов на долгосрочной основе при сохранении их для удовлетворения потребностей будущих поколений. При этом хозяйственная

деятельность на водных объектах связана с прямым или косвенным использованием водных биоресурсов. Условно можно выделить 2 категории такого использования:

1. Хозяйственная деятельность, направленная на изъятие водных биоресурсов из среды их обитания, т. е. рыболовство. В ходе такой деятельности осуществляется прямое воздействие на ресурсы в виде их изъятия из естественной среды обитания в рамках установленных объёмов добычи.

2. Хозяйственная деятельность, направленная на использование акватории и берегов водных объектов и водных ресурсов, т. е. строительство гидротехнических сооружений, забор водных ресурсов, сброс сточных вод, добыча полезных ископаемых и т. д. В ходе таких работ зачастую происходит сокращение среды обитания рыб и снижение их кормовой базы. При этом правовыми нормами эта деятельность фактически отнесена к использованию водных биоресурсов, поскольку согласно Федеральному закону от 20.12.2004 г. № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» и методике [6] итоговый размер вреда, причинённый водным биоресурсам, исчисляется в натуральном выражении в единицах измерения массы рыб. Кроме того, возмещение такого вреда в подавляющем большинстве случаев осуществляется посредством искусственного воспроизводства и выпуска личинок (молоди) рыб в водные объекты [7].

Относительно международного опыта регулирования использования водных биоресурсов стоит отметить следующее. С одной стороны, регулирование сферы рыболовства в развитых зарубежных странах (ЕС, США и Канада) и Российской Федерации (РФ) основано, главным образом, на схожих принципах [8]. С другой стороны, например, в европейских странах сложилась несколько иная практика, связанная с косвенным использованием водных биоресурсов. Определение вреда, наносимого водной экосистеме, определяется экспертным суждением и не предполагает применения специальных методик [9, 10].

Таким образом, целью работы является исследование правового регулирования сферы использования водных биоресурсов в Российской Федерации, выявление проблем и предложение путей их решения.

Материалы и методы исследования

В исследовании применяли методы контент-анализа, систематизации и струк-

туризации информации. Исследовательская работа проведена в несколько этапов:

1. Анализ федерального законодательства в сфере регулирования хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов, включая федеральные законы, постановления правительства РФ, ведомственные акты. Исследование проводили с применением справочно-правовых систем «Гарант» и «Кодекс». Кроме того, проведён анализ научных публикаций в сфере использования гидробионтов с применением инструментов поиска на сайте Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и средств семантического поиска на сайте ResearchGate за период 2000–2019 гг. Ключевые слова, использованные в процессе поиска: водные биоресурсы, рыбные ресурсы, правовое регулирование, хозяйственное использование, сохранение биоразнообразия. Выделены часто встречающиеся проблемы в сфере регулирования использования ресурсов.

2. Интервью с хозяйствующими субъектами, в ходе которых выделены основные проблемы правоприменения регулирования деятельности, в том числе на стыке отраслей права.

3. Полученные данные систематизированы и на их основе разработаны меры по совершенствованию регуляторных норм в сфере использования водных биоресурсов.

Результаты и обсуждение

В настоящее время можно выделить следующие (но не единственные) проблемы правового регулирования хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов в РФ.

1. Взаимодействие различных отраслей права в пределах одной акватории.

1.1. Создание и расширение территории особо охраняемых природных территорий в целях сохранения экосистем и вступление в действие ряда ограничений на осуществление хозяйственной деятельности может приводить к невозможности осуществления рыболовства в традиционных районах промысла или ведения иной деятельности. Ярким примером может выступить запрет на осуществление промышленного рыболовства в Унской губе Белого моря в результате создания национального парка Онежское Поморье, что повлекло развитие конфликтной ситуации [11].

1.2. Взаимодействие нескольких отраслей права при осуществлении рыболовства. Так, в

ходе осуществления добычи рыбы промышленные бригады в той или иной мере задействуют прибрежные участки земли в целях проведения операций с орудиями лова, проживания, приёмки рыбной продукции и т. д. При этом договор о предоставлении рыболовного участка распространяется только на акваторию водного объекта, что влечёт необходимость аренды земельных участков, выделение которых происходит отдельно от процедуры предоставления рыболовного участка. Кроме того, например, Водным кодексом РФ введено ограничение на передвижение автотранспорта в водоохранной зоне водного объекта вне дорог. В качестве другого примера можно привести лов краснокнижных видов рыб в научно-исследовательских целях. В ходе таких работ используются сетные орудия лова с различной ячейкой, что обуславливает прилов иных видов рыб. При этом рыболовство первых регулируется актами Министерства природных ресурсов и экологии РФ, а вторых – актами Министерства сельского хозяйства РФ, что влечёт необходимость оформления нескольких разрешительных документов и подготовки множественной отчётности.

2. Взаимодействие различных внутриведомственных норм права в пределах одной акватории.

2.1. Совместное использование акватории для осуществления различных видов деятельности на основе разрешительных документов. Так, например, в одном и том же районе водного объекта может осуществляться рыболовство с постановкой стационарного орудия добычи – сёмужьего выбоа на основе договора о предоставлении рыболовного участка и решения региональной комиссии о регулировании добычи анадромных видов рыб [12]. В то же время в этом же районе на основе решения о согласовании хозяйственной деятельности может происходить разработка месторождения песка с использованием плавкрана, в ходе работы которого образуются шлейфы взвешенных веществ, что оказывает сильное воздействие на результативность добычи рыбы. Другим примером может являться осуществление 2 видов рыболовства – промышленного и любительского – на одной акватории водного объекта. При этом хозяйствующий субъект несёт затраты на участие в конкурсе на право заключения договора о предоставлении участка и содержание такого участка. В то же время рыбаки-любители могут осуществлять лов на его участке сво-

бодно и бесплатно [13], что приводит к конфликту интересов сторон.

2.2. Распространение действия специализированного отраслевого законодательства на широкий круг хозяйственной деятельности. Правилами рыболовства для различных рыбохозяйственных бассейнов предусмотрены ограничения по срокам осуществления рыболовства. В то же время такие ограничения, изначально предусмотренные под определённый вид деятельности, зачастую распространяют в ходе подготовки разрешительных документов и на ведение хозяйственной деятельности, связанной со строительством и реконструкцией гидротехнических объектов. С одной стороны, это позволяет предотвратить нанесение вреда рыбным запасам и обеспечить условия для миграций и нереста рыб. С другой стороны, при осуществлении хозяйственной деятельности субъекты проводят оценку её воздействия на окружающую среду и возмещают нанесённый вред. Кроме того, учитывая небольшой безледовый период на севере нашей страны, такие ограничения значительно сокращают период работ и увеличивают срок реализации проектов.

3. Внутреннее противоречие в норме права. Так, например, согласно [6], хозяйствующим субъектам, деятельность которых наносит вред водным биоресурсам менее 10 кг в натуральном выражении, предоставлена льгота в виде освобождения от обязательства возмещения такого вреда, безотносительно к размеру экосистемы. Однако хозяйствующие субъекты, чья деятельность наносит вред более 10 кг в натуральном выражении, обязаны возместить такой вред в полном объёме, включая первые 10 кг. В конечном счёте, получается, что второй хозяйствующий субъект находится в худшем положении.

Таким образом, анализ норм права и научных публикаций, а также интервью с хозяйствующими субъектами, показали множественность проблем при регулировании хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов в РФ. Зачастую отсутствует чёткость и полнота в формулировке отдельных норм, встречается противоречивость и декларативность положений. Особенно ярко это проявляется на стыке отраслей права при регулировании одной деятельности и даже в ходе правоприменения в рамках одной отрасли. Одной из причин сложностей в регулировании сферы использования водных биоресурсов может являться быстрый рост изменений природоохранного законодательства. Отмечается, что за период 1998–2017 гг. доля

изменений, приходящаяся на один закон, выросла в 17 раз [14]. Другой причиной является отсылочный характер многих норм природоохранного законодательства [15]. Это влечёт за собой правовые пробелы в регулировании смежных областей. Считаем, что дальнейшее развитие природоохранного законодательства и регулирования использования водных биоресурсов, в частности, может проводиться по следующим направлениям.

1. Разработка норм регулирования в сфере использования водных биоресурсов на стыке отраслей права в рамках развиваемого направления проектного управления посредством создания межотраслевых экспертных групп с привлечением заинтересованных сторон. Успешным примером такой работы является подготовка норм, регулирующих получение в аренду без проведения торгов земельного участка для осуществления аквакультуры, что позволило учесть интересы хозяйствующих субъектов при работе на стыке рыбохозяйственного и земельного законодательства.

Частным случаем такой работы может стать разработка методических рекомендаций по процедурам создания особо охраняемых природных территорий, направленных на учёт интересов сторон и снижение числа конфликтных ситуаций, связанных с такими территориями. Примером такого компромисса может являться достижение согласия между органами государственной власти, крупными лесопромышленниками и природоохранными организациями по границам Двинско-Пинежского заказника в Архангельской области [11]. Кроме того, целесообразна проработка и обсуждение вопроса о возмещении затрат, ранее понесённых хозяйствующими субъектами в случае изменения правового режима территории и введения ограничений на осуществление хозяйственной деятельности. Реализация этой меры возможна в рамках применения биоэкономической модели управления водными биоресурсами [16], на основе которой оцениваются биологические и социально-экономические последствия стратегий управления ресурсами.

2. Внутриведомственная разработка норм регулирования в сфере использования водных биоресурсов на основе метода проектного управления посредством создания экспертных групп с привлечением специалистов различного направления и заинтересованных сторон, а также проведение верификации разрабатываемых норм регулирования с уже действующим законодательством.

Так, целесообразна разработка в оценке воздействия на окружающую среду мер по ограничению сроков хозяйственной деятельности с учётом видов работ, мероприятий по предупреждению негативного воздействия, факторов такого воздействия, размера наносимого вреда и предусмотренных мероприятий по возмещению такого вреда. Например, в случае нанесения вреда водным биоресурсам вследствие утраты нерестовых площадей в ходе работ в прибрежной зоне водного объекта и учёта этого в оценке воздействия на окружающую среду целесообразно исключить ограничение по срокам производства работ в пределах указанного района работ.

3. Совершенствование договорного права в сфере использования водных биоресурсов. Одним из направления такой работы может выступить разработка мер, направленных на предоставление экосистемных услуг в сфере возмещения вреда, наносимого рыбам и их кормовой базе путём введения временного ограничения рыболовства в определённом районе добычи водных биоресурсов для восстановления популяций водных организмов с возмещением расходов пользователям, осуществляющим рыболовство. Это позволит в определённой степени учесть интересы сторон при совместной эксплуатации акватории водного объекта. Формой регламентации взаимоотношений в данном случае выступит соглашение между сторонами. Плательщиком в данном случае выступает хозяйствующий субъект, ведущий деятельность на водном объекте, в ходе которой наносится вред водным биоресурсам (например, дноуглубительные работы, добыча песка, прокладка трубопроводов и т. д.). Введение таких соглашений в механизм возмещения вреда позволит расширить возможности для проведения мероприятий и внедрить в практику инструмент естественного восстановления экосистем, а также учесть интересы сторон в использовании водного объекта для различных целей. Практика реализации таких соглашений распространена в зарубежных странах.

Заключение

Таким образом, гармонизация регулирования хозяйственной деятельности в сфере использования водных биоресурсов позволит снять излишние административные барьеры для роста экономики страны и в то же время сохранить природные ресурсы и перейти на развитие страны в рамках сбалансированного развития. Кроме того, совершенствование си-

стемы взаимодействия науки, власти и бизнеса в создании механизма долгосрочного использования водных биоресурсов и согласование интересов сторон при совместном использовании водных объектов позволит достичь синергетического эффекта в их деятельности, направленной на обеспечение максимума уловов при сохранении численности и биологического разнообразия рыб, роста рентабельности рыбодобывающих организаций, поставку населению качественной рыбопродукции, создание рабочих мест, сохранение и развитие прибрежных сообществ.

References

1. FAO yearbook. Fishery and Aquaculture Statistics 2017. Rome. 2019. 108 p. [Internet resource] <http://www.fao.org/3/ca5495t/ca5495t.pdf> (Accessed: 23.10.2019).
2. Fulton E., Smith A.D.M., Smith D.C., van Putten I.E. Human behaviour: the key source of uncertainty in fisheries management // *Fish and Fisheries*. 2010. V. 12. No. 1. P. 2–17. doi: 10.1111/j.1467-2979.2010.00371.x
3. FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. 224 p. doi: 10.4060/ca9229en
4. Cochrane K.L. Reconciling sustainability, economic efficiency and equity in fisheries: the one that got away // *Fish and Fisheries*. 2000. V. 1. No. 1. P. 3–21. doi: 10.1046/j.1467-2979.2000.00003.x
5. Dolan A.H., Taylor M., Neis B., Ommer R., Eyles J., Schneider D., Montevecchi B. Restructuring and health in Canadian coastal communities // *EcoHealth*. 2005. V. 2. P. 1–14. doi: 10.1007/s10393-005-6333-7
6. Rosrybolovstvo order dated 06.05.2020 No. 238 “On approval of the Methodology for determining the consequences of negative impacts during construction, reconstruction, overhaul of capital construction facilities, the introduction of new technological processes and other activities on the state of water biological resources and their habitat and the development of measures to eliminate the consequences of negative effects on the state of water biological resources and the environment their habitat, aimed at restoring their disturbed state” [Internet resource] <https://base.garant.ru> (Accessed: 22.06.2021).
7. Practical guidance on the development and application of measures for the conservation of aquatic biological resources in order to compensate for harm in the conduct of economic and other activities / Ed. A.N. Belousov. Moskva: Edithus, 2016. 272 p. (in Russian).
8. Sivakov D.O. Legal regulation of fisheries in Russia and foreign countries: general and special // *Zhurnal zarubezhnogo zakonodatelstva i sravnitel'nogo pravovedeniya*. 2017. No. 5 (66). P. 135–141 (in Russian). doi: 10.12737/article_59bbac21afe586.37871733

9. Miedzinski M. Assessing environmental impacts of research and innovation policy // Study for the European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Brussels, 2013. 43 p. doi: 10.2777/5779
10. Kaplan E.M., Shvarts A.A., Makushenko M.E., Rumynin V.G., Luneva E.V. Transboundary aspect of assessing the impact of NPPS under construction on aquatic ecosystems: case study of the Baltiiskaya NPP // Water Resources. 2016. V. 43. No. 7. P. 911–922. doi: 10.1134/S0097807816070046
11. Smirennikova E.V., Ukhanova A.V., Voronina L.V. Conflicts in the specially protected natural territories of the Arctic region: identification, analysis and solutions // Economic and social changes: facts, trends, forecast. 2019. V. 12. No. 3. P. 107–123 (in Russian). doi: 10.15838/esc.2019.3.62.7
12. Studenov I.I., Tortsev A.M. Fishing sites as a tool for managing the region's fish resources // Rybnoe khozyaystvo. 2019. No. 2. P. 30–35 (in Russian).
13. Tortsev A.M., Smirennikova E.V. Perspective directions of development of fishing tourism in the Arkhangelsk region // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 1–1 [Internet resource] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18450> (in Russian) (Accessed: 22.06.2021).
14. Blokov I.P. Environment and its protection in Russia. Change over 25 years. Moskva: OMNO Greenpeace Council, 2018. 432 p. (in Russian).
15. Kruglov V.V. On the problems of legal regulation of environmental protection and rational use of natural resources in the region // Rossiyskoe pravo: obrazovanie, praktika, nauka. 2010. No. 5–6. P. 15–22 (in Russian).
16. Doyen L., Béné C., Bertignac M., Blanchard F., Cissé A.A., Dichmont C., Gourguet S., Guyader O., Hardy P.-Y., Jennings S., Richard Little L., Macher C., Mills D.J., Nussair A., Pascoe S., Perea J.-C., Sanz N., Schwarz A.-M., Smith T., Thébaud O. Ecoviability for ecosystem-based fisheries management // Fish and Fisheries. 2017. V. 18. No. 6. P. 1056–1072. doi: 10.1111/faf.12224

Системный подход как научная парадигма естественно-научного познания

© 2022. Л. Ш. Ахмедова, к. б. н., доцент,
А. А. Гаджиев, к. б. н., доцент, Н. О. Гусейнова, к. б. н., доцент,
Дагестанский государственный университет,
367000, Россия, г. Махачкала, ул. Дахадаева, д. 21,
e-mail: nadira_guseynova@mail.ru

В статье рассматривается смена методологической парадигмы в естествознании в XX веке, раскрываются ключевые понятия и смыслы. Переход на новую – системную парадигму многие специалисты оценивают как революционный процесс в современном естествознании. Основной смысл произошедшей революции состоит в размывании междисциплинарных границ, сложившихся за многовековую историю специализации наук по их объектам, конструировании логических и математических моделей, несовместимых, на первый взгляд, объектов и т. д. Системный подход в качестве общенаучного принципа познания и социальной практики, изначального представления объектов исследования как систем ориентируется на выявление внутренней структуры исследуемого объекта и раскрытия его целостных свойств и качеств с привлечением методов моделирования, логического конструирования, объяснения, предвидения и т. д.

Основная процедура и результат системного анализа – построение обобщённой модели объекта исследований с выявлением свойств целостности. Системный анализ предполагает решение трёх задач с соответствующей расстановкой акцентов согласно целям исследования: анализ истории объекта безотносительно к его структуре; анализ структуры объекта безотносительно к его истории; структурно-генетический анализ объекта, который может выступать как в форме объяснения истории объекта через его структуру, так и в форме объяснения структуры объекта через его историю.

Ключевые слова: парадигма, методология, система, системный подход, системный анализ, естествознание, устойчивое развитие.

System approach as a scientific paradigm of natural science knowledge

© 2022. L. Sh. Akhmedova ORCID: 0000-0003-1347-1429
A. A. Gadzhiev ORCID: 0000-0002-7359-1951
N. O. Guseynova ORCID: 0000-0003-3979-4293
Dagestan State University,
21, Dakhadaev St., Makhachkala, Russia, 367000,
e-mail: nadira_guseynova@mail.ru

The article discusses the change in the methodological paradigm of natural science in the twentieth century and reveals the key concepts and meanings. The transition to a new systemic paradigm is regarded by many experts as a revolutionary process in modern natural science. The main meaning of the revolution that has taken place is the blurring of interdisciplinary boundaries that have developed over the centuries-old history of specialization of sciences according to their objects, the construction of logical and mathematical models that are incompatible at first glance, objects, etc. The system approach as a general scientific principle of cognition and social practice, the initial presentation of research objects as systems is focused on revealing the internal structure of the object under study and revealing its integral properties and qualities with the involvement of modeling methods, logical design, explanation, foresight, etc.

The main procedure and result of system analysis is the construction of a generalized model of the research object with the identification of integrity properties. System analysis involves the solution of three tasks with the appropriate placement of accents according to the objectives of the study: analysis of the history of the object, regardless of its structure; analysis of the structure of the object, regardless of its history; structural-genetic analysis of the object, which can act both in the form of an explanation of the history of the object through its structure, and in the form of an explanation of the structure of the object through its history.

Keywords: paradigm, methodology, system, system approach, system analysis, natural science, sustainable development.

С середины XX века происходит стремительный рост внимания практически всех слоёв общественности, особенно в промышленно развитых странах, к проблемам окружающей среды. Такие опасные явления как «озоновые дыры» и «кислотные дожди», опустынивание и засоление земель, аварийные разливы нефти и т. д. хорошо известны не только специалистам, но и широким слоям населения. Осознание хрупкости человеческой жизни и её зависимости от техногенных рисков и аварий в глобальном масштабе прочно утвердилось в умонастроениях людей после Чернобыльской катастрофы и аварии на атомной станции в Фукусиме.

Переход на новую – системную парадигму многие специалисты оценивают как революционный процесс в современном естествознании. Основной смысл произошедшей революции состоит в размывании междисциплинарных границ, сложившихся за многовековую историю специализации наук по их объектам, конструировании логических и математических моделей, несовместимых, на первый взгляд, объектов, разработке высокоэвристичных познавательных инвариантов и т. д.

В сознание специалистов всё глубже проникает понимание того, что получение результата в научной деятельности непосредственным образом зависит от исходной теоретической установки, подхода к постановке и обоснованию проблемы, предварительной рабочей гипотезы и определения путей движения научной мысли и набора средств, используемых для достижения цели.

Парадигма – многоаспектное понятие, введённое американским науковедом Т. Куном [1, 2]. В широком, общеметодологическом смысле парадигмой называют господствующий на данном историческом этапе способ и тип научного мышления, выраженный в относительной согласованности взглядов на явления и вещи окружающего мира. В более узком смысле парадигма – система господствующих на данном этапе убеждений и взглядов, разделяемых большей частью научной общественности. Например, смена парадигмы ньютоновской механики на квантовую, основанную на принципах дополненности, соответствия, неопределённости, когда классическую механику стали рассматривать как частный случай более общей теории. Аналогичный процесс произошёл и в естественных науках, в том числе и в экологии.

Методология в широком смысле означает область знания, изучающая средства

и принципы организации познавательной и практически-преобразующей деятельности. В этом смысле методология тесно связана с гносеологией (теорией познания), анализирующей всеобщие законы и характеристики познавательной деятельности, рассматриваемые в курсе философии. В более узком смысле методология науки – совокупность, весь арсенал познавательных средств, методов (объяснения, доказательство, эксперимент), логической организации анализа данных (выводное знание), используемых в какой-либо конкретной науке.

Системный анализ и системный подход также входят в компетенцию методологии в этом узком смысле. В дальнейшем мы будем пользоваться данными понятиями, имея в виду, что человек имеет достаточную подготовку в теории познания по философским дисциплинам.

Приведённый краткий комментарий к ключевым понятиям позволяет оценить условия смены традиционной парадигмы на системную, проанализировать современные методологические приоритеты в построении теоретического знания. Особый интерес в связи с этим представляет современная экология, теоретическая компонента которой складывалась в условиях ввода в научный оборот понятия «экосистема» как объекта исследования.

Целью данного исследования является анализ предпосылок для формирования смены методологической парадигмы в естествознании к середине XX века и становление системного подхода как принципа познания, раскрытие ключевых понятий и смыслов.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели в статье использовались системный и обзорно-аналитический методы. Проанализированы научные труды отечественных и иностранных учёных, начиная с 50-х г. XX века и по настоящее время, т. е. в период, когда происходила смена методологической парадигмы в естествознании.

Релевантный поиск был осуществлён с помощью идентичного поискового запроса в библиографических поисковых системах по ключевым словам, названиям статей, авторам (в Национальной электронной библиотеке eLIBRARY.RU, а также на специализированном сайте научной электронной библиотеки «КиберЛенинка», на поисковом сайте Google Scholar, в политематических реферативно-

библиографических и наукометрических базах данных Scopus и Web of Science).

Для развития научного познания в XX веке и построения картины мира стало характерно всё нарастающее внимание к способам и методам научной деятельности и получения конечного результата. К середине XX века в сознание специалистов всё глубже проникает понимание того, что получение результата в научной деятельности непосредственным образом зависит от исходной теоретической установки, подхода к постановке, обоснованию проблемы, предварительной рабочей гипотезы, определения путей движения научной мысли и набора средств, используемых для достижения цели.

С середины XX века во всех естественных науках начал проявляться обострённый интерес к методологической составляющей науки, стремление не просто к воспроизведению и отображению в знании изучаемого фрагмента реальности, но и целенаправленной теоретической деятельности на осмысление собственных действий, методологических оснований процесса познания, т. е. то, что принято называть рефлексией. Наиболее ярким проявлением рефлексии явился всё усиливающийся отход от наглядных образов и методов исследования, широкое привлечение формальных, логико-методологических приложений математики к ряду естественных наук, которые ранее полностью обходились без них. В этом отношении далеко продвинулись фундаментальные и прикладные труды по экологии [3–7], что способствовало окончательному утверждению системной парадигмы, опирающейся на концепцию экосистемы как основы предмета современной экологии.

Эти и многие другие трудности в получении новых знаний привели к решительному пересмотру научной парадигмы, поиску других, более эффективных (эвристичных) путей и процедур получения теоретического знания. Особенно очевидными стали недостатки традиционных подходов, когда с середины XX века приступили к исследованию, моделированию и конструированию сложных динамических систем с привлечением быстродействующих электронно-вычислительных машин (кибернетика, информатика, системотехника). С этого времени в научный обиход активно вошли такие понятия, как система, системный подход, системный анализ, широко стали применяться терминология и символика теории множеств, математической логики. И дело здесь не в словоприменении, а в сущностном

изменении подходов к исследовательским процедурам, в смене научной парадигмы.

Традиционная методологическая парадигма в естествознании

Традиционный теоретический стереотип естествознания, методологический образец мышления в постановке и решении научно-практических задач складывался, начиная с XVII века, благодаря успехам классической механики (Галилей, Ньютон и др.), и просуществовал в качестве господствующей парадигмы до середины XX века. Философскую основу традиционной парадигмы составляли последовательно сменявшие друг друга различные течения и направления в теории познания: метафизика, позитивизм, неопозитивизм и др.

Традиционный стереотип, которого придерживается и в настоящее время значительная часть специалистов, в том числе и в экологии, заключается в сочетании произвольных и неконтролируемых гипотетических установок и схем с культом первичных эмпирических материалов, не связанных с какими-либо методологическими построениями исследователя.

Характерные черты традиционной парадигмы хорошо известны и сводятся в основном к следующему:

1. Объекты научного исследования даны в готовом виде самой природой и задача исследователя – всесторонняя и полная характеристика объектов.

2. Ведущая роль в исследовании принадлежит наблюдению, измерению, эксперименту.

3. Индуктивный синтез экспериментальных данных – единственный путь построения подлинно научного знания, противостоящего дедуктивным спекуляциям.

4. Основное назначение теоретических схем – систематизация, классификация эмпирических данных и предсказание новых, а не объяснение исследуемой реальности.

При использовании традиционного подхода к научному исследованию необходимо обратить внимание на два момента:

1. Природа даёт не объекты исследования в готовом виде, а представляет собой бесконечное разнообразие по признакам, свойствам и характеристикам реальности. Выделение из этого разнообразия конкретного объекта исследования представляет собой логико-методологическую процедуру, подчиняющуюся определённым правилам.

2. Утверждение, убеждение и возможность построения научной теории путём индуктивного обобщения эмпирических данных – одно из наиболее распространённых заблуждений. Группа учёных, проанализировав многочисленные прецеденты построения теорий, пришли к заключению, что ни одна из них не была создана только путём индуктивного обобщения эмпирических данных – все они были созданы методами гипотетико-дедуктивного моделирования [8].

Здесь уместно напомнить высказывание известного английского физика и организатора науки Дж. Бернала о том, что «... утвердившийся взгляд на науку описывает её законы и теории как закономерные и даже логические выводы из экспериментальных фактов. Сомнительно, чтобы при наличии такого ограничения существовала бы какая-нибудь наука» [9]. Достаточно авторитетное суждение, высказанное в начале становления системного подхода в физике, когда квантовая механика поставила трудноразрешимые проблемы с точки зрения традиционного подхода.

Системный подход и системный анализ: основные понятия и термины

Термином «система» специалисты пользовались с древнейших времён в самых разных областях знания, например, солнечная и звёздная система, нервная и кровеносная система, экономическая и политическая система, травопольная и транспортная система и т. д. Однако до середины XX века слово «система» оставалось термином свободного пользования, поскольку системный подход не получил статуса внутренней единой исследовательской позиции, научной парадигмы.

Тем не менее в работах ряда естествоиспытателей XIX и начала XX веков можно обнаружить многие положения системного подхода. Близкие к современным идеи системного подхода высказывал известный немецкий агрохимик Юстус Либих: «Все явления связаны друг с другом без начала и конца... Мы рассматривали природу как одно целое, и все явления представляются нам взаимно связанными, как узлы в сети» [10].

Более определённые взгляды на этот счёт высказывал наш соотечественник А.А. Богданов, которого многие специалисты считают основоположником системной концепции. В работе «Всеобщая организационная наука (тектология)» её автор, в частности, писал: «... организационная наука характеризуется

прежде всего и больше всего своей точкой зрения», «... всякая задача практики и теории сводится к тектологическому вопросу: о способе наиболее целесообразно организовать некоторую совокупность элементов, реальных или идеальных...» [11].

Изложению основных положений общей теории систем посвящено множество работ, среди которых можно отметить труды Н. Винера [12], У.Р. Эшби [13], А. Ляпунова [14], М. Месаровича [15], Э. Юдина [16], Л. Берталанди [17], Дж. Форрестера [18] и др. Значительно больше работ посвящено системным исследованиям в конкретных научных дисциплинах, в том числе и при изучении экосистем. Среди последних высоким уровнем культуры системного мышления отличаются учебники Ю. Одум [3], В.Д. Федорова, Т.Г. Гильманова [4].

Проникновение системных взглядов в массовое сознание разнопрофильных специалистов началось со времени выхода книги «Исследования по общей теории систем» [19]. История становления и развития системных исследований в нашей стране и за рубежом подробно освещена в работе «Становление и сущность системного подхода» [20].

С 1969 г. выходит ежегодник «Системные исследования» [21], в которых рассматриваются не только философско-методологические аспекты теории систем, но и приводятся результаты системных исследований в конкретных областях знания, в том числе и в экологии.

К настоящему времени сложилось большое количество специфических для системного подхода понятий и принципов.

Системный подход – общенаучный принцип познания и социальной практики, изначального (в явном виде) представления объектов исследования как систем; ориентируется на выявление внутренней структуры исследуемого объекта и раскрытия его целостных свойств и качеств с привлечением методов моделирования, логического конструирования, объяснения, предвидения и т. д.

Системный анализ – совокупность методологических, технических и аналитических средств, используемых для постановки, обоснования и решения сложных комплексных проблем; опирается на системный подход и современные методы теории управления с привлечением методов ряда математических дисциплин. Основная процедура и результат системного анализа – построение обобщённой модели объекта исследований с выявлением свойств целостности.

Системный анализ предполагает решение трёх задач с соответствующей расстановкой акцентов согласно целям исследования: анализ истории объекта безотносительно к его структуре; анализ структуры объекта безотносительно к его истории; структурно-генетический анализ объекта, который может выступать как в форме объяснения истории объекта через его структуру, так и в форме объяснения структуры объекта через его историю [20].

Две первые задачи взаимосвязаны и соответствуют диалектическим принципам развития и единства мира, а результаты решения двух первых задач служат основанием для решения третьей задачи (структурно-генетической), соответствующей абстрактно-теоретическому уровню познания. Все три задачи направлены на восстановление полной структуры целостного и организованного объекта (экосистемы).

Таким образом, и системный подход, и системный анализ складывались в условиях смены научной парадигмы, составляют её основную суть и содержание.

Особенности системного подхода

В условиях веками складывавшегося традиционного подхода внимание специалистов полностью было приковано к объекту исследования (воздух, вода, почва, растение, животное и т. д.), а прогресс познания, успех научного исследования измерялся и оценивался исключительно по совокупному конечному результату.

К настоящему времени произошла переориентация внимания специалистов от оценки конечного результата к процедурам его получения, к вопросам логики и методологии движения исследовательской мысли от рабочей гипотезы к теоретическим обобщениям и выводам. Такой переворот был обусловлен множеством причин, и главные выводы среди них могут быть следующие:

1) Возросшая сложность актуальных научных проблем, для решения которых требовалась огромная техническая оснащённость с привлечением значительных национальных ресурсов, а порой и международной кооперации (например, работы в ядерной физике, которые оказались обременительны для национальных бюджетов). В этих обстоятельствах неизбежно встаёт вопрос о критериях экономической эффективности проектируемых затрат, соотношения их с ожидаемыми результатами.

2) Необходимость привлечения для решения проектируемых работ большого количества разноплановых специалистов, превращение науки в коллективный труд, когда лидер коллектива вынужден объяснять исходные основания научно-практических разработок, методологию достижения цели.

3) Междисциплинарный характер большинства современных научных проблем, разрушение методических редутов, возведённых между специализированными по объектам исследования научными дисциплинами, что потребовало необходимость выработки конструктивных познавательных инвариантов.

Это легко понять на примере экологических исследований, в которых приходится рассматривать в единой системе объекты живой и неживой природы, а также ресурсопотребительскую деятельность человека. Поэтому не случайно, что среди всех естественных наук именно в экологии системные исследования получили наибольшее развитие, а основным объектом науки принята экосистема, т. е. изначально, в формулировке научной дисциплины даётся установка на системный характер исследований.

В настоящее время системный подход составляет основу теории управления сложными системами и широко применяется во многих сферах человеческой деятельности в виде логистических схем движения и перемещения услуг и товаров, управления движением городского транспорта, мониторинга особо охраняемых природных территорий [22], создания комфортной экологической среды и т. д.

Заключение

Смена методологической парадигмы в естествознании в XX веке с традиционной на системную многие специалисты оценивают как революционный процесс. Основной его смысл – размывание междисциплинарных границ, сложившихся за многовековую историю специализации наук по их объектам; конструирование логических и математических моделей, несовместимых объектов; разработка высокоэвристичных познавательных инвариантов и т. д. Системный подход ориентируется на выявление внутренней структуры исследуемого объекта и раскрытие его целостных свойств и качеств с привлечением методов моделирования, логического конструирования, объяснения, предвидения.

Основной результат системного анализа – построение обобщённой модели объекта иссле-

дований с выявлением свойств целостности. Системный анализ предполагает решение трёх задач: анализ истории объекта безотносительно к его структуре; анализ структуры объекта безотносительно к его истории; структурно-генетический анализ объекта, который может выступать как в форме объяснения истории объекта через его структуру, так и в форме объяснения структуры объекта через его историю.

Системный подход и системный анализ, складываясь в условиях смены научной парадигмы, составляют её основную суть и содержание.

References

1. Kuhn T. Structure of scientific revolutions. Moskva: AST, 2002. 606 p. (in Russian).
2. Kuhn T. The structure of scientific revolutions. 2ed. Chicago, London: University of Chicago Press Ltd, 1970. 210 p.
3. Odum Yu. Fundamentals of ecology. Moskva: Mir, 1975. 741 p. (in Russian).
4. Fedorov V.D., Gilmanov T.G. Ecology. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1980. 464 p. (in Russian).
5. Akhmedova L.Sh., Gasanov Sh.Sh. Biodiversity and ecosystem resilience: measurement, assessment, interpretation. Makhachkala: Publishing House of IPE RD "Ecopres", 2015. 352 p. (in Russian).
6. Abdurakhmanov G.M., Gasanov Sh.Sh., Akhmedova L.Sh., Radzhabova R.T. Again on sustainable development from the perspective of environmental measurements // South of Russia: Ecology, Development. 2014. No. 4. P. 7–16 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2014-4-7-16
7. Akhmedova L.Sh., Radzhabova R.T., Guseynova N.O., Kuramagomedov B.M. Geoecological evaluation of sustainable development of the Republic of Dagestan and normalizing the anthropogenic burden // South of Russia: Ecology, Development. 2015. No. 1. P. 177–184 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2015-1-177-184
8. Merkulov I.P. Hypothetical-deductive model and development of scientific knowledge. Problems and prospects of methodological analysis. Moskva: Nauka, 1980. 188 p. (in Russian).
9. Bernal J.D. The emergence of life. Moskva: Mir, 1969. 392 p. (in Russian).
10. Liebig Yu. Chemistry in application to agriculture and physiology. Leningrad: Selkhozgiz, 1936. 72 p. (in Russian).
11. Bogdanov A.A. General organizational science (tectology). Leningrad–Moskva: Kniga, 1925. 109 p. (in Russian).
12. Viner N. Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine. 2nd ed. Moskva: Sovetskoe radio, 1968. 325 p.
13. Ashby W.R. Introduction to cybernetics. Moskva: Publishing house of foreign literature, 1959. 432 p.
14. Lyapunov A.A. What is the systematic approach to the study of real objects of complex nature // Sbornik trudov Akademii nauk SSSR, Sibirskoe otdelenie, Institut matematiki. Novosibirsk, 1970. No. 6. P. 44–56 (in Russian).
15. Mesarovich M. Theory of hierarchical multi-level systems. Translation from English // Foreword corresponding member Academy of Sciences of the USSR G.S. Pospelova / Ed. I.F. Shakhnova. Moskva: Mir, 1973. 344 p. (in Russian).
16. Yudin E.G. Methodology of science. Consistency. Activity. Philosophers of Russia of the XX century. Moskva: Editorial URSS, 1997. 444 p. (in Russian).
17. Bertalanffy L. General systems theory – a critical review. Studies in General Systems Theory: Collection of Translations // Eds. V.N. Sadovsky, E.G. Yudin. Moskva: Progress, 1969. P. 23–82.
18. Forrester J. Fundamentals of enterprise cybernetics (Industrial dynamics) / Ed. D.M. Gvishiani. Moskva: Progress, 1971. 340 p.
19. Research on the general theory of systems. Moskva: Progress Publishing House, 1969. 520 p. (in Russian).
20. Blauberg I.V., Yudin E.G. Formation and essence of the system approach. Moskva: Nauka, 1973. 271 p. (in Russian).
21. System Research. Yearbook [Internet resource] http://systems-analysis.ru/systems_research.html (Accessed: 06.05.2021).
22. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096

Actualization of the “green” image for territorial development

© 2022. A. A. Sozinova¹ ORCID: 0000-0001-5876-2823, V. A. Bondarenko² ORCID: 0000-0003-2921-7548,
M. Smokova³ ORCID: 0000-0001-8854-9433, N. G. Rumyantsev⁴ ORCID: 0000-0002-3524-6233,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Rostov State University of Economics (RINH),
69, B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, Russia, 344082,
³Centre for International Affairs Erasmus
of D. A. Tsenov Academy of Economics,
2, Em. Chakarov St., Svishtov, Bulgaria, 5250,
⁴Belgorod State National Research University,
85, Pobedy St., Belgorod, Russia, 308015,
e-mail: b14v@yandex.ru, aa_sozinova@vyatsu.ru

The article explores the importance of forming a “green” image of the territory for the purpose of its successful development in the context of the formation of a “green” model of the economy. The study characterizes the situation of transition from the “brown” to the “green” economic model within the framework of generally accepted sustainable development targets. In this regard, the views of scientists on the use of marketing solutions are disclosed: “green” branding, “green” marketing strategies, “green” image in terms of enhancing territorial development. The need for a trinity of efforts for “green” development on the part of the authorities, business and the population has been clarified. Data on the development of a number of areas of environmental goods and services in Russia and abroad are given.

In the Russian context, for the full manifestation of positive global trends in terms of the “green” development of the economy and the “green” positioning of territories for an appropriate positive image, it is necessary to carry out comprehensive work, coupled with the efforts of the authorities to form an appropriate institutional environment, the necessary infrastructure and actively implement “green” state procurement, as well as encouraging businesses that implement “green” marketing strategies and involve the population in conscious responsible consumption.

The authors substantiate the need to form a “green” image of the territory, based on the involvement of the local population in the goals of the ecological development of the region, the growth in demand for environmental goods and services, the combination of the interests of government and business in this process based on the conjugation of the tasks of attracting investments and other resources, as well as growth satisfied local communities.

The approach proposed by the authors can become the basis of marketing decisions in building a “green” image of Russian territories, which in the long run will form the basis of consumer satisfaction, the competitiveness of territories in terms of attracting various resources and conducting an environmentally oriented business.

Keywords: “green” image, “green” model of the economy, involvement of the population, “green” purchases, territory, development.

УДК 339.926

Актуализация «зелёного» имиджа для территориального развития

© 2022. А. А. Созинова¹, д. э. н., профессор,
В. А. Бондаренко², д. э. н., зав. кафедрой,
М. Смокова³, к. э. н., директор, институциональный координатор,
Н. Г. Румянцев⁴, соискатель,

¹Вятский государственный университет,

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

²Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),
344082, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, д. 69,

³Центр международных отношений Эразмус Экономической академии имени Д. А. Ценова, 5250, Болгария, г. Свиштов, ул. Чакарова, д. 2,
⁴Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, д. 85, e-mail: b14v@yandex.ru, aa_sozinova@vyatsu.ru

В статье исследовано значение формирования «зелёного» имиджа территории с целью её успешного развития в условиях становления «зелёной» модели экономики. В исследовании охарактеризована ситуация перехода от «коричневой» к «зелёной» модели экономики в рамках общепринятых целевых установок устойчивого развития. В данной связи раскрыты взгляды учёных на применение маркетинговых решений: «зелёного» брендинга, «зелёных» маркетинговых стратегий, «зелёного» имиджа в части активизации территориального развития. Уточнена необходимость триединства усилий по «зелёному» развитию со стороны властей, бизнеса и населения. Приведены данные по развитию ряда направлений экологических товаров и услуг в России и за рубежом.

В российских условиях для полноценного проявления положительных мировых тенденций в части «зелёного» развития экономики и «зелёного» позиционирования территорий и соответствующего положительного имиджа необходимо проведение комплексной работы, сопряжённой с усилиями властей по формированию соответствующей институциональной среды, необходимой инфраструктуры и активного проведения «зелёных» государственных закупок, а также поощрения бизнеса, реализующего «зелёные» маркетинговые стратегии и вовлечение населения в осознанное ответственное потребление.

Авторами обосновывается необходимость формирования «зелёного» имиджа территории, основанная на вовлечении местного населения в цели экологического развития региона, роста спроса на экологические товары и услуги, сочетания в данном процессе интересов власти и бизнеса на основе сопряжения задач привлечения инвестиций и иных ресурсов, а также роста удовлетворённости местных сообществ.

Предложенный авторами подход может стать основой маркетинговых решений в построении «зелёного» имиджа российских территорий, что в пролонгированной перспективе будет формировать базис удовлетворённости потребителей, конкурентоспособности территорий в плане привлечения различных ресурсов и ведения экологически ориентированного бизнеса.

Ключевые слова: «зелёный» имидж, «зелёная» модель экономики, вовлечение населения, «зелёные» закупки, территория, развитие.

In the contemporary world “green” economy is a necessary part of sustainable development [1, 2]. The “green” model of economy management differs from the previous “brown” model. The difference consists of several points. Firstly, it focuses not only on production growth and profit maximization, it takes into account ecological and social effects for the society together with the economical ones [3]. This approach supposes minimization of ecological risks and lowering anthropogenic load on the landscape as much as possible.

The shift to a “green” economy model depends on the efforts of the authorities, as well as on business responsibility, ecological values of the majority of the society members also matter. The authorities’ efforts deal with legislation norms and regulation of economy management with regard to the aims of “green” development [4]. The aims include activating resource efficient economy, sustainable use of all the resources, improvement of the population’s quality of life, and large-scale adoption of the policy of “green” development [5]. Non-financial reporting publication shows inclusion of business into these processes, it demonstrates responsibility of businesses, as well as their

engagement in social and ecological aims of development [6]. People’s wish to buy goods and services of socially responsible companies shows that the society accepts the “green” model of economy management [7].

There are dominants in choosing “green” development of the society and economy. On the whole, they predetermine the territories’ interest in “green” marketing and, consequently, in creating and managing the “green” image of the territory. This image reflects the interests of the authorities, business, and population. It allows attracting investors, activating business in the region, and makes both the population and the visitors of the region feeling comfortable, satisfied, and aware of the prestige and, at the same time, being responsible, which is quite approvable in the society. On this account the research aim of the paper consists in analyzing the degree of priority of the “green” image for successful development of the territory, which is the result of marketing efforts.

Materials and methods of research

Actually there are few papers on “green” image. The search in Russian Science Citation

Index resulted in 25 papers dated from 2012 to nowadays, and they include just 8 papers devoted to the role of “green” image in territorial development. Searches in the international databases of Scopus and Web of Science resulted in not more than 150 papers devoted to the topic with the keyword “green image of the territory”. As a result of publication content-analysis, we selected the papers which are only the most topical and the most connected with the aims of our research. Besides, due to the results of our web search query, in order to broaden the scientific grounds of the research, we added some keywords for the search; we considered papers on “green” economy, marketing strategies in positioning the territory.

The research of issues of forming “green” image for territorial development supposes analytical approach. First of all they consider that in the contemporary world, the establishment of the model of “green” economy has not got any other alternative. “Green” marketing strategies help to position the territory as a desirable place of residence and to attract investments. The issues of the current demand of ecological goods and services abroad, as compared with those in our country, are the subject to analysis as well.

It is important to objectively estimate the importance of the “green” image for successful sustainable development of the territory in the longer term. This approach supposes such research methods as comparative data analysis, scientific generalization, and synthesis of the information.

“Green” image for development of the territory

Researchers realize that marketing decisions play an important role in successful development of the territory which is oriented to ecological targets and to creating a “green” image. They [8] point out changes in marketing business-functions of the companies which strive to answer ecological and social requirements of the society.

Foreign researchers, such as [9], think that developing a “green” marketing complex for goods and services is topical nowadays. One can adopt this approach to the needs of territorial development in case the territory offers the product to the party of interest (buyers).

Other foreign researchers [10] underline the importance of “green” marketing strategies for business development in contemporary conditions. They show different ecological

strategies for business, and they suppose that business should “deeply immerse” in “green” management. Thus, the territories which encourage and reward such a kind of activity can also develop these marketing strategies for successful work with target audiences.

Russian researchers consider the issue of making a “green” brand of the territory. For example, they [11] analyze the specific features of the territorial development on the basis of marketing decisions and they consider the ecological brand of the region which is based on its unique “green” image to be very important. The researchers belonging to the south-Russian school of economy and marketing consider the issues of making a “green” brand of the southern macro-region [12, 13].

The researchers consider the social identity of the population and their activity in grasping the aims of development of their permanent residence territory. The authors of some papers analyze involvement of the members of the civic community and businessmen in achieving ecological wellbeing of the region [14, 15]. Representatives of law science [16] consider the issues of exhausting the environment for the purpose of cost-effectiveness and/or for the purpose of social wellbeing.

In practice marketing of territorial development shows itself from the social-ethical side. There is an example of a social advertisement in Moscow, as well as in 20 more megalopolises of Russia which contains the slogan “Waste has its home” [17]. It encourages the people to care for their city being clean. Also there is an example of professional uniting of producers of ecological goods and services into “Ecocluster”, it unites about 40 business partners from Russia and Europe, they offer the opportunities of eco-tourism in some regions of our country [18].

All the above-mentioned proves the high topicality of both theoretical and practical issues of forming the “green” image of the territories of Russia and it also proves the need for further research in this sphere.

The scenario of actualization of the “green” image

According to the UNO Environmental Program forecasting the world economic development up to 2050, in case of prolonging the scenario of 2% investment of the gross world product in “green” economy, there can happen a radical shift to the resource-saving

and resource-effective model all over the world [19]. This scenario makes the “green” image non-competitive and having no alternative.

From the marketing point of view the green “image” of a territory supposes active development of “green” marketing strategies. Local companies producing goods and services realize these strategies; they implement ecologically protective technologies and hold up the corresponding institutional environment, which is supported by the regional authorities. It is important to introduce the image to the target audiences, for example, to business, and, on the one hand, they should follow the “green” rules, on the other hand, they should be able to get a certain bonus by means of putting “green” products on the market.

Still in order to make positioning the “green” image of the territory a success the efforts of the authorities and business are not enough. It is necessary that the population takes an active part in the process, and the population consists of consumers who are aware of both their responsibility and new quality of life. It is possible to increase the “green” demand only on condition that the population is interested in and accepts the values of the “green” image. Then the growing demand allows increasing the offer.

The market of organic farming can exemplify the increase of “green” demand. From 2000 to 2015 it had grown more than four times and it has reached 81.6 milliard dollars. The USA takes the leading position in this market (their market share is 47%), they are followed by European countries (their combined market share is over 38%) [20]. As for ecological, organic products, consumers have different targets. For example, experts show that in the USA people adhere to a healthy lifestyle, while in Europe (for instance, in Germany) people are concerned about ecological wellbeing of the environment first of all, which makes them consume ecological products [21].

Foreign consumers show their interest in staying at eco-hotels and other places of collective accommodation. In such places they use energy-efficient and resource-efficient technologies in daily work, and such hotels are preferably situated in the areas with a favorable “green” image [22, 23].

Also the demand on electric cars is growing considerably. It is initiated by the authorities by means of introducing restrictions and prohibitions, by the business community which takes place in their production and use, by the consumers who drive such cars, it happens due to growth of the consumers’ awareness and

deliberateness of their choice. According to the statistics, in 2016 in Europe they bought over 500 thousand electric and hybrid cars. So, as compared with the previous period, the purchases of such cars increased more than by 20% [24].

Changes in the scenario of economy management, redesigning the space of the territories, and creating comfortable urban environment in former industrial districts of megalopolises is a good example that proves the importance of the “green” image of territorial development; such processes take place both in the USA and in Europe [25, 26]. Innovative alteration takes place in former industrial areas. They choose a new model of positioning which is based on ecological wellbeing, comfort, and the “green” image.

Nowadays experts state that Russia fails to keep pace with the leaders of the world market in the sphere of producing ecological products and services, our country lags behind by 15–20 years. For example, as for the market of electric cars, their sales are not more than 100 cars annually. First of all, the reason is high prices, as well as lack of infrastructure and good business incentives [27]. As for “green” hotel business in Russia, Russian consumers consider such hotels as a product of exclusive quality, of luxury, one can interpret such an approach as eco-hedonism [28]. Nevertheless, in Russian megalopolises they create and put into practice their ecological strategies. There is a rating of ecological wellbeing of regions in Russia [29], which means certain development within worldwide trends.

Thus, it is possible to state that the need in the “green” image for healthy territorial development in Russia is to grow. Activation of this process is connected with growth of people’s awareness of the importance of ecologically oriented consuming behavior, as well as with their involvement in making a responsible choice [30]. “Green” public procurement is also a very important trigger of growth of offer and demand for “green” products and services, as well as of development of necessary infrastructure and stimulating creation of the “green” image. It has shown its efficiency in some European countries, for instance in Denmark and Sweden its share is about 40% [31].

Conclusion

A thorough analysis of research literature and scenarios of “green” image actualization

for territorial development proved certain facts. Firstly, in the contemporary world the “green” image of the territory gives a considerable and necessary privilege in attracting investments and increasing satisfaction of the population and business in the territory. It gives new opportunities for development. In case of prolonging the targets of the “green” model of economy it will become a constituent part of regions’ successful positioning in their competition for all kinds of resources.

Secondly, forming a fully-featured “green” image of the territory needs joint actions of the authorities, business, and population. The population is to be involved in the targets as it forms the potential market for ecological goods and services.

Thirdly, nowadays in Russia the above-mentioned processes are less seen than in Europe or in the USA. Still the vector of development of the “green” model of economy keeps up with the world’s tendencies. It is economically sound to increase ecological demand, as it is a means of having the population involved in sustainable development and it is a means of population’s encouraging businesses to participate in “green” projects. Developing the segment of “green” public procurement is important, it leads to growth of the market, to formation of the necessary infrastructure and it helps to develop the environmental culture of the population. Keeping up with these tendencies is to result in forming and establishing the “green” image as a necessary condition of successful sustainable development of the territories.

References

1. Bondarenko V.A., Efremenko I.N., Guzenko N.V. Theoretical substantiation of the formation of green economy and its prospects for Russia // *Financial Research*. 2019. No. 2 (63). P. 23–31 (in Russian).
2. Lyaskovskaya E.A., Grigorieva K.A. Formation of green economy and sustainability of development of the country and regions // *Bulletin of SUSU. Economics and Management Series*. 2018. V. 12. No. 1. P. 15–22 (in Russian). doi: 10.14529/em180102
3. Dementieva A.G., Sokolova M.I. The concept of sustainable development and socio-ethical marketing // *Proceedings of the Ural State University of Economics*. 2018. V. 19. No. 5. P. 5–14 (in Russian). doi: 10.29141/2073-1019-2018-19-5-1
4. Antonova N.E., Lomakina N.V. Model of “green” economy and its implementation in resource regions // *Regionalistika*. 2019. V. 6. No. 5. P. 31–49 (in Russian). doi: 10.14530/reg.2019.5.31
5. Green Growth Indicators (Russian version) [Internet resource] https://read.oecd-ilibrary.org/environment/green-growth-indicators-2014_9789264256767-ru#page7 (Accessed: 10.09.2020).
6. Sozinova A.A., Kosyakova I.V., Kuznetsova I.G., Stolyarov N.O. Corporate social responsibility in the context of the 2020 economic crisis and its contribution to sustainable development // *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap* / Eds. E.G. Popkova, B.S. Sergi. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. V. 198. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-69415-9_10
7. Karagiorgos T. Corporate social responsibility and financial performance: an empirical analysis on Greek companies // *European Research Studies*. 2010. V. XIII. No. 4. P. 85–108.
8. Zaitseva D.S., Krakovetskaya I.S. Environmental marketing: trends and prospects // *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences*. 2016. No. 2. P. 55–60 (in Russian).
9. Polonsky M.J., Rosenberger P.J. Reevaluating green marketing: a strategic approach // *Business Horizons*. 2001. V. 44. No. 5. P. 21–30. doi: 10.1016/S0007-6813(01)80057-4
10. Ginsburg J.M., Bloom P.N. Choosing the right green marketing strategy // *MIT Sloan Manag. Rev.* 2004. V. 46. No. 1. P. 79–84.
11. Kalieva O.M. Formation of brand-image of the territory: a marketing approach // *Bulletin of the Orenburg State University*. 2014. No. 4 (175). P. 177–185 (in Russian).
12. Bondarenko V.A., Epifanova T.V., Chernysheva Yu.G., Alekseychik T.V., Bogachev T.V. “Green” branding of Russia’s southern macro-region: the concept of future development // *Albekov A.U., Israilova E.A., Polubotko A.A., Matishov G.G., Parkhomenko T.V., Medvedkin T.S., Bodiagin O.V., Kuznetsov N.G., Rodionova N.D., Ponomareva M.A., Lakhno Y.V., Ivanova O.B., Semenyuta O.G., Khakhonova N.N., Medvedkina E.A., Bogataya I.N., Kuznetsova E.V., Andreeva O.V., Fedorenko S.I., Epifanova T.V. Green economics. Modernization of the socio-economic system of Southern Russia. Rostov-na-Donu: Rostovskiy gosudarstvennyy ekonomicheskiy universitet “RINKh”, 2017. P. 237–273 (in Russian).*
13. Bondarenko V.A., Diyanova S.N., Dzhum T.A., Dubinina M.A. Residents interest to form a “green” territory brand // *European Research Studies Journal*. 2018. V. 21. No. S1. P. 51–62.
14. Bondarenko V.A., Ivanchenko O.V., Kalieva O.M. The study of social identity of the inhabitants of Russian regions in terms of formation of the regional brand // *Practical Marketing*. 2017. No. 7 (245). P. 30–40 (in Russian).
15. Gordeeva Y.M. Uncertainty and multifunctionality: legal challenges and opportunities for “Green Infrastructure” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 217–223. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-217-223

16. Debelaya I.D., Morozova G.Y. Urban protected areas in the green infrastructure of Khabarovsk // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-203-209
17. Environmental Social Advertising // *Environmental Lifestyle Newspaper*. 21.04.2015 [Internet resource] <http://gaztagreccnecity.ru/2015/04/21/ekologicheskaya-socialnaya-reklama> (Accessed: 10.09.2020) (in Russian).
18. The first national ecobrand in Russia “Ecocluster” // *Ecocluster*. 01.02.2012 [Internet resource] http://ecocluster.ru/helpful_information/7ID=2232 (Accessed: 10.09.2020) (in Russian).
19. Towards a “green” economy: ways to sustainable development and poverty eradication – a synthesis report for representatives of power structures [Internet resource] http://old.ecocongress.info/5_congr/docs/doklad.pdf (Accessed: 10.09.2020) (in Russian).
20. The Word of Organic Agriculture: Statistics & Emerging Trends 2017. FiBL & IFOAM – Organic International (2017): Frick and Bonn, 2017-02-20 / Eds. H. Willer, J. Lernoud [Internet resource] <http://fibl.org/fileadmin/documents/shop/3503-organic-world-2017.pdf> (Accessed: 10.09.2020).
21. Why and How buyers buy ecological goods: report on the results of the study of behavior of responsible consumers interested in buying ecological goods. Moskva: NP “Ecological Union” and Ecobureau Greens, 2018. 24 p. (in Russian).
22. Galenko E.V., Krivoruchka P.O. Tourist's preferences when choosing an ecological hotel // *Azimuth of Scientific Research: Economics and Management*. 2018. V. 7. No. 2 (23). P. 110–113 (in Russian).
23. Booking.com named sustainable tourism trends in 2017 [Internet resource] <http://prohotelia.com> (Accessed: 10.09.2020) (in Russian).
24. “Green” car: why the whole world is switching to eco-transport [Internet resource] <https://tass.ru/obshchestvo/4044852> (Accessed: 08.10.2020) (in Russian).
25. Maltsev A.A., Mordvinova A.E. Restructuring of old industrial regions of Europe: experience and problems // *Manager*. 2016. No. 3 (61). P. 8–13 (in Russian).
26. Maltsev A.A., Mordvinova A.E. American model of revitalization of old industrial regions // *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Economics*. 2018. V. 26. No. 1. P. 76–88 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2329-2018-26-1-76-88
27. Mishulina S.I., Bondarenko T.I. “Green” demand as a factor and condition of ecological modernization of economy // *Bulletin of Volgograd State University. Series 3. Economics. Ecology*. 2019. V. 21. No. 2. P. 99–112 (in Russian). doi: 10.15688/jvolsu3.2019.2.9
28. Kuzmina I.N., Shuvalov V.M. Ecological hotel as part of the nature-saving strategy of ecotourism // *Science, Education and Experimental Design*. Moskva: MAI, 2017. P. 62–63 (in Russian).
29. National ecological rating of the subjects of the Russian Federation 2019 [Internet resource] <https://greenpatrol.ru/ru/novosti/nacionalnyy-ekologicheskyy-reyting-subektov-rossiyskoy-federacii-po-itogam-oseni-2019-goda> (Accessed: 10.09.2020) (in Russian).
30. Dushkova D.O., Kirillov S.N. Ecologization of consciousness as one of the basic principles of environmental policy // *Bulletin of Volgograd State University. Series 3. Economics. Ecology*. 2017. V. 19. No. 2. P. 148–158 (in Russian). doi: 10.15688/jvolsu3.2017.2.15
31. Berzina S. Prospective activities, problems and their solutions in the application of green procurement [Internet resource] http://old.greenlogic.by/content/files/ECOCertification/seminar_apr_2014/6.Meropriyatiya_problemy_i_resheniya_S.Berzina.pdf (Accessed: 08.10.2020) (in Russian).

Анализ цитогенетического статуса детей и подростков, проживающих на территориях с разной экологической обстановкой

© 2022. С. В. Ермолаева, к. б. н., доцент, Е. О. Иванов, аспирант,
Ульяновский государственный университет,
432970, Россия, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, д. 42,
e-mail: erm_iv@mail.ru

Цитогенетический статус может являться маркером экологического неблагополучия на определённой территории. Данный показатель определяют по частоте микроядер в клетках буккального эпителия. Наибольшее загрязнение атмосферного воздуха отмечено в г. Ульяновске и Сенгилеевском районе. В питьевой воде Сенгилеевского и Чердаклинского районов обнаружены железо и марганец в концентрациях до 2,5 и 10 раз выше предельно допустимых концентраций (ПДК). В почвах этих районов содержание Pb, Zn и Ni до 12 раз превышает ПДК. Цель исследования – оценка частоты встречаемости микроядер в клетках буккального эпителия детей и подростков, проживающих в промышленно развитой зоне, по сравнению с таковой у детей, проживающих на экологически благоприятной территории. Препараты готовили по стандартным методикам, анализировали по 1000 клеток на каждого индивида. Контролем послужили показатели частоты микроядер в клетках буккального эпителия школьников Вешкаймского и Сурского районов, в которых превышений ПДК токсикантов не выявлено. Анализ проведён у 418 человек в возрасте 9–15 лет, проживающих на исследуемых территориях. Частота микроядер в клетках буккального эпителия школьников Засвияжского р-на Ульяновска составила $1,46 \pm 0,87\%$, что в 7 раз выше контроля, во второй группе (Чердаклинский р-н) – $1,22 \pm 0,95\%$ (в 6 раз выше контроля), в 3 выборке (Сенгилеевский р-н) – $1,19 \pm 0,44\%$ (в 5 раз выше контроля). Индекс цитогенетических нарушений в 1 группе – 4,18 (высокий уровень риска), во 2-й группе – 3,42 (умеренный уровень риска), в 3-ей группе – 4,00 (высокий уровень риска). Установлено генотоксическое действие поллютантов в окружающей среде г. Ульяновска (Засвияжский р-н) и Сенгилеевского р-на.

Ключевые слова: цитогенетический статус, буккальный эпителий, индекс накопления цитогенетических нарушений, группы риска.

Analysis of the cytogenetic status of children and adolescents in the living in areas with different environmental conditions

© 2022. S. V. Ermolaeva ORCID: 0000-0002-7791-5001

E. O. Ivanov ORCID: 0000-0001-8447-7524

Ulyanovsk State University,

42, L'va Tolstogo St., Ulyanovsk, Russia, 432970,

e-mail: erm_iv@mail.ru

Cytogenetic status can be a marker of ecological trouble in a certain area. Cytogenetic status is determined by the frequency of micronuclei in buccal epithelial cells. The largest amount of pollutants enters the atmospheric air of Ulyanovsk and the Sengileevsky district. In the drinking water of the Sengileevsky and Cherdaklinsky districts, iron appeared to be up to 10 times higher than the MAC, manganese – up to 2.5 times. The content Pb, Zn, Ni in the soil were up to 12 times higher than the MPC. This study aims to evaluate the frequency of micronuclei in the cells of the buccal epithelium of children and adolescents living in an industrialized zone, compared with that inside children living in areas without significant anthropogenic impacts. The preparations were made according to standard methods. 1000 cells per individual were analyzed. As a control measure we used indicators of the frequency of micronuclei in the cells of children and adolescents from the Veshkaimsky and Sursky districts, in which no excess of the MPC of toxic substances was detected. The analysis was carried out in 418 people aged 9–15 years, permanently residing in the study areas. The frequency of cells with micronuclei in schoolchildren of the Zaslviyazhsky district of the city of Ulyanovsk was $1.46 \pm 0.87\%$ is 7 times higher than the control, in the second group (Cherdaklinsky district) $1.22 \pm 0.95\%$ is 6 times higher than the control, in the 3rd sample (Sengileevsky district) $1.19 \pm 0.44\%$, 5 times more than control. The index of cytogenetic disorders in group 1 – 4.18 (high risk), in group 2 – 3.42 (moderate risk), in group 3 – 4.00 (high risk). The genotoxic effect of pollutants in the environment of Ulyanovsk (Zaslviyazhsky district) and Sengileevsky district was established.

Keywords: ecological safety, cytogenetic status, buccal epithelium, accumulation of cytogenetic disorders, risk groups.

Цитогенетический статус можно определить по частоте цитогенетических случаев в делящихся клетках (хромосомных aberrаций, сестринских хроматидных обменов) или в интерфазных клетках (микроядер, протрузий) [4]. Появление микроядер (МЯ) в клетках буккального эпителия – показатель действия на организм эндо- и экзогенных генотоксических факторов [2]. Для оценки действия различных загрязнителей окружающей среды (ОС) на живые объекты широко применяют микроядерный тест на клетках буккального эпителия слизистой оболочки ротовой полости человека [3]. Показателем нестабильности генома в клетках буккального эпителия служат МЯ, являющиеся хромосомным материалом, возникшим вследствие повреждения молекулы ДНК (цитогенетические показатели) или нарушения структуры и количества хромосом во время митоза (показатели пролиферации) в ответ на действие генотоксических факторов ОС, таким образом, МЯ являются биомаркерами раннего биологического эффекта при токсическом воздействии [4, 5]. Посредством цитогенетического мониторинга возможно выявление зон повышенного риска ОС для здоровья человека [6, 7].

Ульяновская область представляет собой развитый аграрно-промышленный комплекс, основу которого составляет более 400 крупных и средних предприятий. По результатам экологического мониторинга, проводимого ежегодно с 2001 по 2021 гг. специалистами химико-аналитической лаборатории НИТИ им. С.П. Капицы Ульяновского государственного университета и службой Ульяновского центра Росгидромета Российской Федерации (РФ), установлено, что основными загрязнителями атмосферного воздуха районов Ульяновской области являются диоксид азота, формальдегид, взвешенные вещества, бенз[а]-пирен. Наибольший объём твёрдых веществ в виде сажи, цементной и древесной пыли, формальдегида и бенз[а]пирена поступает в атмосферный воздух г. Ульяновска и Сенгилеевского района; диоксида серы, оксида азота и углекислого газа – в атмосферный воздух г. Ульяновска [8, 9]. По данным мониторинга, проводимого специалистами университета, в период с 2015 по 2021 гг. в питьевой воде в Сенгилеевском и Чердаклинском районах выявлено присутствие железа ($Fe_{\text{сум}}$), превышающее предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 1,5–10 раз (июнь 2015–2018, 2020, 2021 гг.) и содержание марганца (Mn), превышающее ПДК в 1,5–2,5 раза (июнь

2015–2018, 2020, 2021 гг.). В исследуемых районах в почве в тот же период обнаружено содержание токсичных металлов (Pb, Zn, Ni), содержание которых от 2 до 12 раз превышает ПДК [9, 10]. В качестве контроля (группы сравнения) использовали показатели цитогенетического статуса детей из Вешкаймского и Сурского районов, экологическая обстановка которых характеризуется как относительно благоприятная, так как за весь период проведения экологического мониторинга превышений ПДК токсических веществ ни в одной из природных сред выявлено не было [9].

Целью настоящего исследования явилась оценка частоты встречаемости микроядер в эксфолиативных клетках буккального эпителия детей и подростков, проживающих в промышленно развитой (загрязнённой) зоне, по сравнению с таковой у детей, проживающих в контрольной зоне без значительных антропогенных воздействий.

Материалы и методы исследования

Для проведения микроядерного анализа готовили препараты эпителиальных клеток по стандартным методикам [11, 12]. Мазки клеток эпителия слизистой ротовой полости принято окрашивать красителем по Романовскому-Гимза, но в соответствии с [13] окраску препаратов производили аце-тоорсеином, так как он позволяет наиболее контрастно окрашивать хроматин ядра в цвет бордо. Окраска эксфолиативных клеток аце-тоорсеином светлым зелёным позволяет выбирать клетки на каждой стадии деструкции ядра [13]. Анализ препаратов осуществляли под микроскопом Primo Star (Carl Zeiss) при увеличениях 40× и 100×. На препарате подсчитывали число клеток с МЯ, просматривая не менее 1000 клеток.

У всех обследованных детей и подростков родители заполнили бланк информированного согласия на проведение кариологического исследования. Микроядерный анализ буккального эпителия был произведён у 418 человек в возрасте от 9 до 15 лет, постоянно проживающих на исследуемых территориях. Различий в показателях МЯ в клетках буккального эпителия среди анализируемых групп детей и подростков в зависимости от пола и возраста, проживающих в пределах одного района, не выявлено. Показатели частоты МЯ в клетках буккального эпителия в половозрастных группах детей и подростков представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Показатели частоты микроядер в клетках буккального эпителия в половозрастных группах детей и подростков (на 1000 клеток), M±SD
 Frequency rates of micronuclei in buccal epithelium cells in age and sex groups of children and adolescents (on the 1000 cells), M±SD

Районы исследования Districts	Возрастные группы / Age groups					
	9–11 лет 9–11 years		12–13 лет 12–13 years		14–15 лет 14–15 years	
	♂	♀	♂	♀	♂	♀
Вешкаймский р-н (n = 73) Veshkaimsky district (n = 73)	0,22±0,11	0,23±0,12	0,22±0,10	0,22±0,11	0,21±0,12	0,22±0,13
Сурский р-н (n = 70) Sursky district (n = 70)	0,21±0,05	0,22±0,04	0,20±0,07	0,21±0,05	0,21±0,07	0,22±0,05
Ульяновск (Засвияжский р-н) (n = 100) Ulyanovsk (Zasviyazhsky district) (n = 100)	1,5±0,9	1,5±0,9	1,5±0,8	1,5±0,9	1,5±0,9	1,5±0,9
Чердаклинский р-н (n = 100) Cherdaklinsky district (n = 100)	1,2±0,9	1,2±1,0	1,2±0,9	1,2±1,0	1,2±1,0	1,2±1,0
Сенгилеевский р-н (n = 75) Sengileevsky district (n = 75)	1,2±0,4	1,2±0,5	1,2±0,5	1,2±0,5	1,2±0,5	1,2±0,5

Возникновение МЯ может индуцироваться мутагенами различной природы, которые длительно воздействуют на ядерные и митотические структуры клетки. Ориентировочная средняя величина частоты клеток с МЯ, рекомендованная в качестве нормативного значения в РФ, равна 0,24±0,03‰ [14]. В процессе анализа учитывали следующие состояния буккальных эпителиоцитов: цитогенетические (клетки с протрузиями (ПРЗ)); показатели пролиферации (клетки с двумя ядрами, со сдвоенными ядрами); степени ранней стадии деструкции ядра (конденсация хроматина, вакуолизация ядра); степени поздней стадии деструкции ядра (кариопикноз (КП), кариорексис (КР), кариолизис (КЛ)) (рис., см. цв. вкладку VI).

В исследовании [15] подчёркивается, что ситуация со значениями МЯ в отслоившихся эпителиальных клетках в зависимости от возраста и пола не до конца изучена, но многочисленные исследования показывают отсутствие достоверных различий в показателях МЯ в клетках буккального эпителия в возрастном диапазоне 5–13 лет и 14–18 лет. Для оценки цитогенетического статуса индивида использовали индекс накопле-

ния цитогенетических нарушений (Index of accumulation of cytogenetic damage, I_{ac}) [16] и разделены на три группы риска: с низким ($I_{ac} \leq 2$), умеренным ($2 < I_{ac} < 4$) и высоким ($I_{ac} \geq 4$) значением индекса. Формула расчёта: $I_{ac} = (I_c \cdot I_p / I_{арор}) \cdot 100$, где I_c – сумма клеток с МЯ, ядерными протрузиями и межъядерными мостами, в ‰, I_p – сумма клеток с двумя и более ядрами, в ‰, $I_{арор}$ – сумма всех клеток в апоптозе, в ‰. Статистический анализ проводили с использованием программы Statistica v.10.0. Он включал описание средних значений, t -критерий Стьюдента. При уровне $p \leq 0,05$ различия оценивались как статистически значимые.

Результаты и обсуждение

Частота клеток с МЯ в первой группе наблюдения у школьников из Засвияжского района г. Ульяновска, составила 1,46±0,87‰, что почти в 7 раз больше, чем в группе сравнения (табл. 2).

Частота двуядерных клеток 1-ой выборки в 1,4 раза выше, чем в группе сравнения ($p < 0,001$). Значительно выше, в 4,75 раза, в выборке № 1 частота клеток со сдвоенными

С. В. Ермолаева, Е. О. Иванов
«Анализ цитогенетического статуса
детей и подростков, проживающих на территориях
с разной экологической обстановкой». С. 235

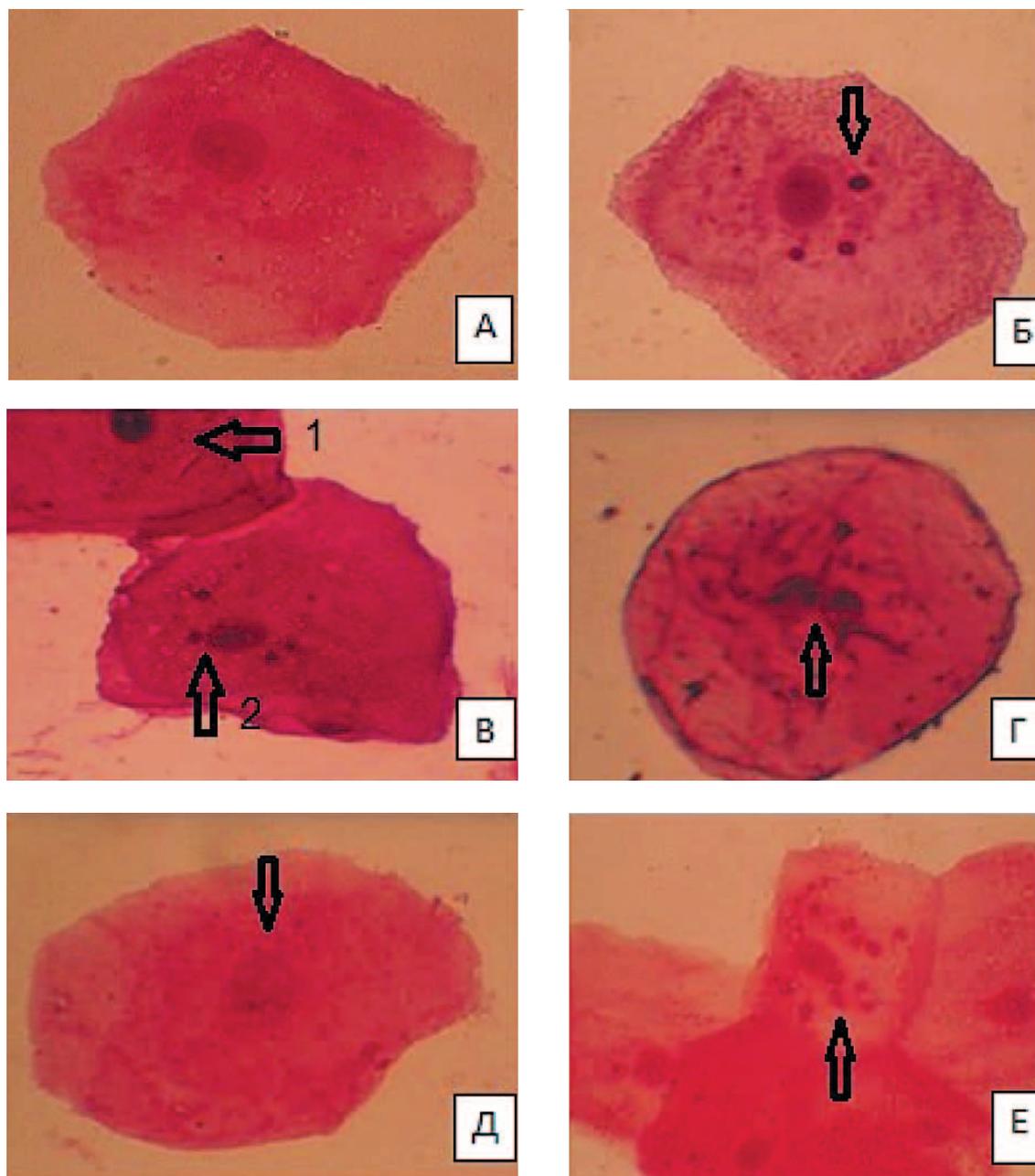


Рис. Эпителиоциты: А – эпителиоцит в норме, Б – клетка с микроядрами (МЯ), В1 – клетка с кариопикнозом, В2 – клетка с протрузиями, Г – клетка с двумя ядрами, Д – клетка с кариолизисом, Е – клетка с множественными МЯ

Fig. Epitheliocytes: А – Normal epithelial cells, Б – cell with micronuclei, В1 – cell with karyopyknosis, В2 – cell with protrusions, Г – cell with two nuclei, Д – cell with karyolysis, Е – cell with multiple micronuclei

ядрами по сравнению с группой сравнения. Количество апоптических клеток с конденсацией хроматина в обследованной группе № 1 значительно превышает данные контрольной группы, но в целом не выходит за рамки ориентировочных нормативных величин 2–400%. Частота клеток с конденсацией хроматина в 1-ой группе наблюдения составила $154 \pm 14\%$, что в 2,14 раз выше показателей группы сравнения. Частота клеток с вакуолизацией ядра в 1-ой группе наблюдения достоверно выше значений группы сравнения (в 1,42 раза). Перинуклеарные вакуоли считаются признаком некроза клетки. Увеличение количества таких клеток отмечается при болезнях накопления [13]. Показатели завершения деструкции ядра в 1-ой группе наблюдения также значительно выше показателей группы сравнения. Так, частота клеток с КП 1-ой группы выборки составила $10,9 \pm 1,7\%$, что достоверно выше частоты клеток с КП группы сравнения. Частота клеток с КР 1-ой группы наблюдения выше, чем показатели группы сравнения, почти в 3 раза. Количество клеток с КП и КР увеличивается при апоптозе [13]. Это естественные процессы разрушения клетки. Количество клеток с полным КЛ в группе наблюдения № 1 в 2 раза больше, чем в группе сравнения.

Интегральный показатель цитогенетического действия, как суммарная величина клеток с МЯ и ПРЗ, в 6 раз выше в 1-ой выборке по сравнению с группой сравнения. Интегральный показатель пролиферации 1-ой выборки составил 3,14, что выше в 1,15 раза по сравнению с контролем. Повышение частоты клеток со сдвоенными и двумя ядрами в совокупности может служить косвенным показателем усиления пролиферации в ткани и указывать на токсическое действие исследуемого фактора [13]. Таким образом, индекс апоптоза в 1-ой группе наблюдения составил 220 ± 15 , что в 2 раза выше индекса апоптоза группы сравнения. Индекс цитогенетических нарушений 1-ой группы наблюдения составил 4,18, что соответствует высокому уровню риска $I_{ac} \geq 4$. Интегральные показатели I_{ac} представлены в таблице 3.

Аналогичным образом проведено сравнение показателей цитогенетического статуса детей и подростков второй группы наблюдения – в Чердаклинском районе (табл. 2). Частота клеток с МЯ во второй группе наблюдения составила $1,22 \pm 0,95\%$, что также выше значений группы сравнения в 5,8 раза. В результате вычислений установ-

лено, что I_{ac} в анализируемой группе составил 3,42, что соответствует умеренному уровню риска $2 < I_{ac} < 4$ (табл. 3).

Сравнение цитогенетических показателей 3-ей группы наблюдения выявило также значительные превышения показателей контроля практически по всем параметрам анализа. Так, частота клеток с МЯ в 3-ей выборке больше, чем в группе контроля, в 5,6 раза (табл. 2). Индекс цитогенетических нарушений 3-ей группы наблюдения составил 4,00, что соответствует высокому уровню риска $I_{ac} \geq 4$ (табл. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о генотоксическом действии факторов ОС в 1-ой и 3-ей группах наблюдения (Засвияжский р-н г. Ульяновска и Сенгилеевский район). В этих районах отмечаются значительные превышения ПДК загрязняющих веществ как в воздухе, так в питьевой воде и почве. Особенно большой объём твёрдых веществ в виде сажи, цементной и древесной пыли отмечен в атмосферном воздухе в г. Ульяновске и Сенгилеевском районе.

В работе [13] показано, что по результатам многочисленных исследований протрузии можно отнести к генетическим цитологическим эффектам. Принимая во внимание роль генетических событий в канцерогенезе и значительном повышении частоты протрузий при онкологических процессах, они могут быть предикторами канцерогенеза. Наличие ядер атипичной формы является одним из основных признаков опухолевых клеток. Сопоставление данных исследования с показателями медицинской статистики по злокачественным новообразованиям (ЗН) среди детей и подростков обнаружило связь между выявленными цитологическими отклонениями и числом опухолевых заболеваний в неблагополучных районах. Так, среднегодовая заболеваемость детей ЗН за период с 2005 по 2021 гг. в районах с благополучной экологической обстановкой составила 2,9 случаев, а в районах, входящих в группы наблюдения – 7,6 ($p \leq 0,05$); 3,6 ($p \geq 0,05$); 4,2 ($p \leq 0,05$) случаев на 1000 человек. Заболеваемость подростков ЗН также оказалась достоверно выше в районах, входящих в группы наблюдения, по сравнению с благополучными районами: группа сравнения – 3,5; группы наблюдения – 7,1 ($p \leq 0,05$); 5,3 ($p \leq 0,05$); 6,7 ($p \leq 0,05$) случаев на 1000 человек.

Результаты аналогичных исследований, проведённых учёными в Италии, Малайзии и Бразилии, свидетельствует о том, что воздействие промышленных загрязнителей воздуха,

Таблица 2 / Table 2

Цитологические показатели буккальных эпителиоцитов (на 1000 клеток), $M \pm SD$
Cytological indicators of buccal epithelial cells (per 1000 cells), $M \pm SD$

Показатели Indicators	Вешкаймский и Сурский р-ны Veshkaimsky and Sursky districts	г. Ульяновск (Засвияжский р-н) Ulyanovsk (Zasviyazhsk ydistrict)	Чердаклин- ский р-н Cherdaklinsky district	Сенгилеев- ский р-н Sengileevsky district	
	группа сравнения comparison groups		группы наблюдения observation groups		
	1 (n = 143)	1 (n = 100)	2 (n = 100)	3 (n = 75)	
Цитогенетические показатели, ‰ / Cytogenetic indicators, ‰					
Частота клеток с МЯ The frequency of cells with micronuclei	0,21±0,12	1,5±0,9*	1,2±1,0*	1,2±0,4*	
Частота клеток с ПРЗ The frequency of cells with protrusions	0,19±0,05	1,5±0,8*	0,32±0,05*	0,66±0,23*	
Показатели пролиферации, ‰ / Proliferation rates, ‰					
Частота клеток с 2 ядрами Cell frequency with 2 nuclei	2,7±0,7	3,8±0,9*	3,2±1,7*	3,0±1,3*	
Частота клеток со сдвоенными ядрами / The frequency of cells with double nuclei	0,08±0,03	0,38±0,07*	0,36±0,09*	0,24±0,06*	
Показатели ранней деструкции ядра, ‰ / Indicators of early destruction of the nucleus, ‰					
Частота клеток с конденсацией хроматина Frequency of cells with chromatin condensation	72±13	154±14*	110±14*	109±5*	
Частота клеток с вакуолизацией ядра Frequency of cells with nucleus vacuolization	21,6±2,4	30,6±6,4*	22,1±3,0*	22,1±2,7*	
Показатели завершения деструкции ядра, ‰ / Nucleus destruction completion rates, ‰					
Частота клеток с КП Frequency of cells with karyopyknosis	1,66±0,17	10,9±1,7*	7,9±2,7*	7,2±2,1*	
Частота клеток с КР Frequency of cells with karyorexis	1,13±0,02	3,5±1,0*	2,5±0,4*	1,2±0,8	
Частота клеток с полным КЛ Frequency of cells with full karyolysis	10,9±0,8	20,8±2,2*	15,9±1,3*	12,1±1,5*	

Примечание: * – различия статистически значимы при сравнении групп наблюдения с 1 группой сравнения при $p \leq 0,05$.

Note: * – the differences are statistically significant when comparing the observation groups with the 1st comparison group at $p \leq 0.05$.

в том числе мелкодисперсных твёрдых частиц, в значительной степени влияет на образование МЯ клеток буккального эпителия [17–19] и увеличивает распространённость респираторных симптомов среди детей, живущих в непосредственной близости от промышленной зоны [18]. При этом показано, что наблюдае-

мое в исследовании увеличение частоты МЯ трудно объяснить каким-либо конкретным токсичным элементом, интегрированным в твёрдые частицы [17]. Тем не менее, показана слабая положительная корреляция между содержанием полициклических ароматических углеводородов и показателями микроядерного

Таблица 3 / Table 3

Интегральные показатели индекса накопления цитогенетических нарушений
Integral indicators of the accumulation index of cytogenetic disorders

Показатели Indicators	Группа сравнения Comparison groups	Группы наблюдения Observation groups		
	1	1	2	3
Интегральный показатель цитогенетического действия (сумма клеток с МЯ и ПРЗ) (I_c) Integral indicator of cytogenetic action (the sum of cells with micronuclei and protrusions) (I_c)	0,40±0,13	2,9±0,9	1,5±0,5	1,85±0,32
Интегральный показатель пролиферации (сумма клеток с двумя ядрами и со сдвоенными ядрами) (I_p) Integral index of proliferation (the sum of cells with two nuclei and with double nuclei) (I_p)	2,8±0,7	3,1±1,0	3,5±1,7	3,3±1,4
Апоптотический индекс (сумма клеток с ранней и поздней деструкцией ядра) ($I_{арор}$) Apoptotic index (sum of cells with early and late nuclear destruction) ($I_{арор}$)	107±12	220±15	158±14	151±9
Индекс накопления цитогенетических нарушений (I_{ac}) Accumulation index of cytogenetic disorders (I_{ac})	1,06	4,18	3,42	4,00

теста буккальных клеток детей. Для концентраций тяжёлых металлов корреляции с показателями микроядерного теста буккальных клеток не наблюдалось [17, 20].

Анализ проб питьевой воды из районов Ульяновской области показал, что одним из загрязняющих питьевую воду веществ является марганец, выявленный в концентрациях до 2,5 ПДК. Известно, что марганец при внешнесредовой экспозиции с питьевой водой обладает мутагенной и окислительной активностью на уровне ДНК соматических клеток [21]. Биомаркерами мутагенного эффекта марганца являются повышенная относительно контроля частота клеток буккального эпителия с цитогенетическими нарушениями.

Заключение

Показатели буккальных эпителиоцитов детей и подростков, проживающих на территориях с существенным загрязнением ОС, значительно выше, чем у детей и подростков, проживающих в районах с относительно благоприятной экологической обстановкой. Результаты анализа цитогенетического статуса детей и подростков рекомендуется использовать в качестве индикаторов для разработки

экологически-реабилитационных и медико-профилактических мероприятий в зонах повышенного экологического риска.

References

1. Revazova Yu.A., Zhurkov V.S. Genetic approaches to assessing the safety of human environmental factors // Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences. 2001. No. 10. P. 77–80 (in Russian).
2. Belyaeva N.N., Ponomareva O.Yu., Alexandrova V.P., Olesinov A.A., Budarina O.V., Gasimova Z.M. The use of non-invasive assessment of the cytological status of the nasal and oral mucosa in social and hygienic monitoring // Gigiena i Sanitariya. 2009. No. 6. P. 74–76 (in Russian).
3. Baldybaeva D.A., Nizamutdinova V.R., Nurtdinova L.R., Volkova A.T., Viktorova T.V. Cytogenetic instability in cells of the buccal epithelium of Ufa animals // Bulletin of the Bashkir State Medical University. 2016. No. 4. P. 25–29 (in Russian).
4. Polyorganic micronucleus test in environmental and hygienic research / Eds. Yu.A. Rakhmanin, L.P. Sycheva. Moskva: Genius, 2007. P. 220–267 (in Russian).
5. Panico A., Grassi T., Bagordo F., Idolo A., Serio F., Tumolo M.R., De Giorgi M., Guido M., Tutino M., De Donno A. Micronucleus frequency in exfoliated buccal cells of children living in an industrialized area of Apulia (Italy) // Int. J.

- Environ. Res. Public Health. 2020. V. 17. Article No. 1208. doi: 10.3390/ijerph17041208
6. Saginbaev U.R., Ovsyannikova L.B., Tselousova O.S. Micronuclear analysis as an indicator of the impact of environmental factors // Continuous medical education and science. 2017. V. 12. No. 4. P. 15–16 (in Russian).
7. Korsakov A.V. Multifactorial technogenic pollution of the environment as a risk factor for the formation of cytogenetic disorders in the population // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2014. No. 2 (42). P. 155–160 (in Russian).
8. State report “On the state and protection of the environment of the Ulyanovsk region in 2020”. Ulyanovsk: OOO “Poligrafist”, 2020. 108 p. [Internet resource] <https://cloud.mail.ru/public/YZ55/32mcK9JrV>. (Accessed: 20.02.2022) (in Russian).
9. Ermolaeva S.V., Zhuravlev V.M., Smagin A.A., Lipatova S.V. Decision support system for assessing the impact of environmental factors on public health based on modeling // Human Ecology. 2016. No. 3. P. 9–17 (in Russian).
10. Markova A.V., Ermolaeva S.V., Goncharenko A.P. Evaluation of soil pollution in the territory of the city of Ulyanovsk with heavy metals // Ecology of Urban Areas. 2019. No. 2. P. 75–79 (in Russian).
11. Guidelines “Assessment of the cytological and cytogenetic status of the mucous membranes of the nasal and oral cavity in humans”. Moskva: Scientific Council of the Russian Academy of Medical Sciences and the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation on human ecology and environmental health, 2005. 37 p. (in Russian).
12. Kalaev V.N., Artyukhov V.G., Nechaeva M.S. Micronucleus test of the buccal epithelium of the human oral cavity: problems, achievements, prospects // Cytology and Genetics. 2014. V. 48. No. 6. P. 62–80 (in Russian).
13. Sycheva L.P. Biological significance, criteria for determination and limits of variation of the full spectrum of karyological parameters in assessing the cytogenetic status of a person // Medicinskaya genetika. 2007. V. 6. No. 11 (65). P. 3–11 (in Russian).
14. Shinkaruk E.V., Agbalyan E.V. Cytogenetic profile and exposure of the urban population of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug to pollutants // Bulletin of the Ural Medical Academic Science. 2019. V. 16. No. 2. P. 253–260 (in Russian).
15. Holland N., Fucic A., Merlo D.F., Sram R., Kirsch-Volders M. Micronuclei in neonates and children: Effects of environmental, genetic, demographic and disease variables // Mutagenesis. 2011. No. 26. P. 51–56. doi: 10.1093/mutage/geq064
16. Sycheva L.P. Cytogenetic monitoring for assessing the safety of the human environment // Gigiena i Sanitaniya. 2012. V. 91. No. 6. P. 68–72 (in Russian).
17. Zani C., Donato F., Ceretti E., Pedrazzani R., Zerbini I., Gelatti U., Feretti D. Genotoxic activity of particulate matter and *in vivo* tests in children exposed to air pollution // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. No. 18. Article No. 5345. doi: 10.3390/ijerph18105345
18. Sopian N.A., Jalaludin J., Mayusi T.Z.A.T., Latif M.T. Increased chromosomal damage among children in proximity to industrial zone // Aerosol Air Qual. Res. 2020. No. 20. P. 944–955. doi: 10.4209/aaqr.2019.12.0653
19. Sisenando H.A., de Medeiros S.R.B., Artaxo P., Saldiva P.H.N., de Souza Hacon S. Micronucleus frequency in children exposed to biomass burning in the Brazilian Legal Amazon region: A control case study // BMC Oral Health. 2012. No. 12. P. 1–7. doi: 10.1186/1472-6831-12-6
20. Zani C., Ceretti E., Feretti D., Villarini M., Moretti M., Verani M., De Donno A., Bonetta S., Buschini A., Bonetti A., Bonizzoni S., Gelatti U. Winter air pollution and genotoxic effects in children living in a highly polluted urban area // Atmosphere. 2021. No. 12. Article No. 1191. doi: 10.3390/atmos12091191
21. Karpova M.V., Zemlyanova M.A., Mazunina D.L. Biomarkers of cytogenetic disorders in the isolated environmental exposure of the population to manganese, stable strontium from drinking water // Gigiena i Sanitaniya. 2016. No. 1. V. 95. P. 102–105 (in Russian).

К юбилею Л. И. Домрачевой



Коллектив редколлегии журнала «Теоретическая и прикладная экология» и коллектив лаборатории биомониторинга Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук сердечно поздравляют Людмилу Ивановну Домрачеву с Юбилеем!

С момента основания и по сей день Людмила Ивановна неустанно трудится во благо нашего издания, являясь заместителем главного редактора журнала, а также его идейным источником, вдохновителем и пламенным апологетом. Людмила Ивановна внесла неоценимый вклад в становление журнала. Благодаря её творческому участию журнал «Теоретическая и прикладная экология» включён в перечень изданий, рекомендуемых ВАК, в международные наукометрические базы данных Scopus и Web of Science, получил признание в умах и сердцах как молодых, начинающих, так и маститых учёных-читателей и авторов журнала.

Более полувека Людмила Ивановна работает на кафедре ботаники (ныне кафедре биологии растений, селекции и семеноводства, микробиологии) Вятской государственной сельскохозяйственной академии (ныне Вятского государственного агротехнологического университета). Её исследования в области почвенной альгологии, микологии и микробиологии

являются достойным продолжением традиций научной школы почвенной альгологии, созданной Заслуженным деятелем науки, профессором ВГСХА Э.А. Штиной. Одним из итогов многолетних исследований Л.И. Домрачевой явилась монография «Цветение» почв и закономерности его развития» (2005), в которой впервые был всесторонне рассмотрен феномен «цветения» почвы, обусловленный массовым сезонным развитием водорослей и цианобактерий. Книга сразу же привлекла внимание специалистов и сохраняет свою актуальность, оставаясь одним из наиболее часто цитируемых источников по данной проблеме. Научная деятельность в лаборатории биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН позволила Людмиле Ивановне разработать новые методы биодиагностики, экспресс-методы биотестирования для целей мониторинга в районах действия предприятий по уничтожению химического оружия, промышленных агломераций, селитебных территорий. Она является постоянным членом оргкомитета и редколлегии сборников материалов ежегодных Всероссийских научно-практических конференций с международным участием «Экология родного края: проблемы и пути их решения» и «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». В последние годы, благодаря усилиям Л.И. Домрачевой в качестве научного редактора, вышли в свет ряд коллективных монографий сотрудников лаборатории биомониторинга, посвящённых вопросам биодиагностики и биоиндикации антропогенных нарушений окружающей среды, а также перспективам микробной ремедиации загрязнённых экосистем.

Научно-исследовательскую деятельность Людмила Ивановна успешно сочетает с преподавательской работой. В качестве профессора кафедры она читает лекции и проводит практические занятия, руководит выполнением магистерских и кандидатских диссертаций. Для многих своих студентов и аспирантов Людмила Ивановна стала настоящим другом и наставником, помогает им завоёвывать призовые места на региональных и Всероссийских конкурсах молодых учёных. Её ученики продолжают развивать идеи о роли водорослей и цианобактерий в почвенных процессах, в том числе ремедиации загрязнённых почв, сорбции тяжёлых металлов, микробной дегградации полимеров, нефтепродуктов, использовании цианобактериальных комплексов в оценке экологического состояния почв.

Людмилу Ивановну коллеги знают не только как талантливого учёного, прекрасного педагога, но и как человека огромного личного обаяния, высоких душевных качеств, жизнерадостного и всегда готового прийти на помощь. Её отличительными чертами являются природный артистизм, тонкий юмор, отличное владение литературным слогом, умение в жизни подмечать и ценить прекрасное.

Мы искренне желаем Людмиле Ивановне крепкого здоровья, оптимизма, большого человеческого счастья и долгих лет творческой жизни!

*Коллектив редколлегии журнала
«Теоретическая и прикладная экология»
и коллектив лаборатории биомониторинга
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

Журнал «Теоретическая и прикладная экология» совершенствуется и развивается

10 мая 2022 г. исполнилось 15 лет со дня создания научного журнала «Теоретическая и прикладная экология». Учредителями журнала с первых дней его деятельности является Издательский дом «Камертон», а с 2018 г. вторым учредителем стал Вятский государственный университет. Редакции журнала повезло в том, что первым и единственным издателем журнала все 15 лет является издательство ООО «О-Краткое». На обложках журнала все эти годы размещаются фотографии уникального фотохудожника Вятского края Александра Широких.

За годы издания журнала произошло много различных событий в его деятельности, а именно, существенно расширилась география авторского коллектива. Статьи публикуются как на русском, так и на английском языках с присвоением идентификатора doi для облегчения поиска публикаций, у каждого автора указывается ORCID. Каждая статья проходит рецензирование тремя рецензентами, состав которых постоянно обновляется и расширяется. Изменился объём журнала со 100 до 250 страниц, увеличено количество цветных вкладок, что позволяет более детально иллюстрировать содержание представленного исследования, дополняя его фотографиями, рисунками, схемами. С 2018 г. в рамках программы развития журнала разработана электронная редакция, создана онлайн-платформа прохождения статей от подачи на рассмотрение до их издания. Отображается информация о проводимых научных экологических форумах, конференциях, молодёжных конкурсах, а также важных для авторов изменениях в правилах подготовки статей для публикации. Сайт журнала систематически обновляется и дополняется, своевременно размещается актуальная информация о каждом выпуске. Читатели журнала имеют

возможность ознакомиться с полнотекстовой версией необходимой для них статьи.

Журнал включён в базы данных Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Scopus, RSCI на платформе WoS, неоднократно успешно проходил перерегистрацию в ВАК и в настоящее время готовится документация на новую перерегистрацию. Важным событием для журнала стало включение его в 2018 г. по итогам конкурса в перечень 100 российских научных журналов в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Редакция журнала «Теоретическая и прикладная экология» нацелена на дальнейшее совершенствование журнала, качественное улучшение содержания, научной и практической значимости материала каждой статьи, расширение географии авторского коллектива, развитие научных контактов с ведущими отечественными и зарубежными учёными.

Безусловно, большая ответственность за продвижение журнала в статус высокорейтинговых научных изданий возлагается, прежде всего, на авторов издаваемых публикаций, на всех членов редколлегии, а также уважаемых рецензентов, которые в оперативном режиме представляют аргументированные рецензии на статьи. С большой благодарностью и признательностью обращаемся ко всем членам редколлегии, рецензентам и авторам с просьбой выдвигать новые идеи и мысли по развитию журнала, стремиться к повышению качества публикуемого материала.

*Главный редактор журнала
«Теоретическая и прикладная экология»,
д.т.н., профессор Т.Я. Ашихмина*

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

26–27 апреля 2022 г. в Вятском государственном университете состоялась XVII 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, Филиал «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Кирово-Чепецке, Кировское отделение № 8612 ПАО Сбербанк.

Работа конференции началась 26 апреля 2022 г. в Инженериуме ВятГУ. Конференцию открыл президент ВятГУ В.Т. Юнгблюд. С приветственным словом перед участниками конференции выступили представители научного сообщества, общественности, региональных министерств и ведомств, городской администрации, предприятий-партнёров. На открытии конференции выступила Глава г. Кирова Е.В. Ковалева, заместитель главы администрации г. Кирова Л.А. Копысова, директор Института биологии Коми НЦ УрО РАН С.В. Дёгтева, председатель Общественной Палаты Кировской области С.Н. Улитин, заместитель министра охраны окружающей среды Кировской области Т.Э. Абашев, заместитель руководителя Западно-Уральского межрегионального управления Росприроднадзора И.М. Гизатуллин, Вице-Президент Союза «Вятская торгово-промышленная палата» Л.И. Перминов, заместитель главного инженера филиала «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» по экологии М.П. Мельник. В ходе приветствия была отмечена значимость ежегодно проводимой конференции, подчеркнута, что вопросы экологии объединяют всех, и усилия каждого человека важны в решении современных экологических проблем. Обширная география участников из России и других государств свидетельствует об актуальности и востребованности экологических исследований во всём мире.

Пленарное заседание конференции открылось докладом директора Государственного природного заповедника «Нургуш» Е.М. Тарасовой «Роль федеральных особо охраняемых территорий в сохранении биологического разнообразия региона» (г. Киров). На пленарном заседании с научными докладами выступили доцент, к.б.н. Н.Н. Назаренко

«Городские почвы как агрессивная среда для накопления опасных для человека микромикробов» (Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж), зав. кафедрой, к.м.н. С.Н. Громова «Экосистема полости рта и её зависимость от стоматологического статуса» (Кировский государственный медицинский университет, г. Киров), доцент, д.ю.н. Е.М. Гордеева «Лесоклиматические проекты для целей декарбонизации регионов России: актуальное правовое обеспечение» (Вятский государственный университет, г. Киров), зав. кафедрой, к.б.н. Е.В. Рябова «Современное состояние экологического образования, воспитания и просвещения в Кировской области» (Вятский государственный университет, г. Киров), в.н.с., д.б.н. С.Ф. Тютиков «Фуллерены и редкие земли в зажогинском шунгите и возможности его использования в биотехнологии» (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва), с.н.с., к.х.н. Н.В. Сырчина «Проблема контроля запахового загрязнения селитебных территорий» (Вятский государственный университет, г. Киров), профессор, д.б.н. Л.В. Кондакова «Развитие зелёного хозяйства в городе Кирове: проблемы и перспективы» (лаборатория биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного университета, г. Киров), зав. лабораторией, д.т.н. Т.Я. Ашихмина «Подходы, технологии и опыт в обращении с промышленными и бытовыми отходами» (лаборатория биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного университета, г. Киров).

Работа конференции продолжилась на секционных заседаниях, которые состоялись в очном формате и онлайн. Секционные заседания были посвящены экологическим проблемам регионов, мониторингу состояния окружающей среды, различным аспектам обращения с отходами производства и потребления, химии и экологии почв, экологии микроорганизмов, растений и животных. Всего на секционных заседаниях участниками конференции было представлено 58 докладов. Секционные доклады вызвали большой интерес, в обсуждении представленных материалов принимали участие учёные,

преподаватели вузов, представители природоохранных служб, молодые исследователи из разных регионов.

Всего в конференции приняли участие 443 человека из 34 городов России, Беларуси, Донецкой Народной Республики, Молдовы, Узбекистана.

Материалы конференции опубликованы в двух сборниках: Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: ВятГУ, 2022. Книга 1. 450 с.; Книга 2. 398 с.

Сборники материалов и программа конференции размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/sbr.php>

В рамках конференции 27 апреля состоялось открытие Регионального молодёжного конкурса «Мой любимый город», посвящённого 650-летию г. Кирова. Конкурс проходит в три этапа с 2022 по 2024 гг. Первый этап

конкурса был проведён при поддержке Кировского отделения № 8612 ПАО Сбербанк. Участники конкурса представили проекты, посвящённые любимому городу: исследование городской среды, изучение качества продукции, обращение с отходами в городе, создание швейных изделий по мотивам архитектуры города, стихи о городе, экскурсии по городу и др. В числе конкурсантов – студенты кировских вузов, учащиеся школ, гимназий и лицеев. Все участники, представившие свои работы на конкурсе, получили сертификаты. Памятные призы и дипломы победителям конкурса вручила помощник Управляющего Кировским отделением № 8612 ПАО Сбербанк Н.В. Храпова.

*Т. Я. Ашихмина, д. т. н., профессор,
г. н. с., зав. НИЛ биомониторинга,
С. Ю. Огородникова, к. б. н., доцент,
с. н. с. НИЛ биомониторинга
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

**Приглашаем принять участие в работе
IV Всероссийского научного форума
«Утилизация и рециклинг отходов
производства и потребления»
г. Киров, 29 ноября – 1 декабря 2022 г.**

В рамках форума будут проходить:

1. IV Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии переработки отходов с получением новой продукции»
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, организация экологического мониторинга»
4. Интеллектуальная игра «Zero Waste»

Организаторы:

Вятский государственный университет, ФГУП «ФЭО»,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук

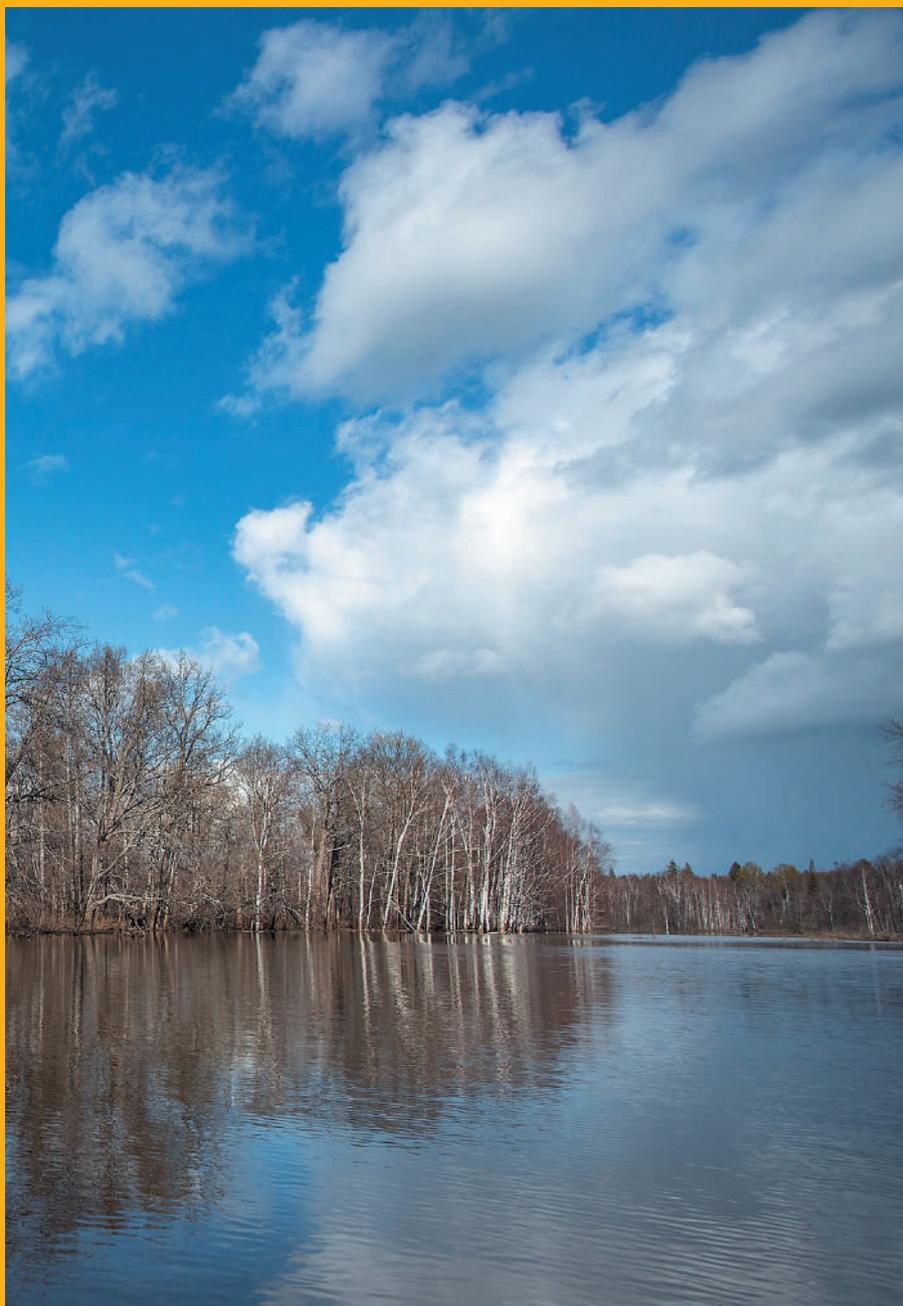
Контакты:

<http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>
e-mail: confbioeco@gmail.com
Тел. 8(8332)37-02-77
Ответственный секретарь
С.Ю. Огородникова

XVII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ЭКОЛОГИЯ РОДНОГО КРАЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ»



Индекс 82027



ISSN 1995-4301



9 771995 430004